

PROYECTO INTEGRADOR DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA NUCLEAR

**CÁLCULO NEUTRÓNICO DETALLADO DE HACES Y
GUÍAS DE NEUTRONES DEL REACTOR RA-10**

Roberto E. Fairhurst Agosta

Mgter. Ariel Márquez
Director

20 de Junio de 2017

Departamento de Física de Reactores y Radiaciones – Centro
Atómico Bariloche

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

A la ciencia

Índice de contenidos

Índice de contenidos	v
Índice de símbolos	ix
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv
Resumen	xvii
Abstract	xix
1. Introducción	1
1.1. Reactor RA-10	1
1.2. Fuentes fría, térmica y haces	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Guías de neutrones	4
1.5. McStas	6
1.5.1. MCNP vs McStas	8
1.5.2. Implementación de McStas	9
2. Descripción de los haces	11
2.1. GF1	12
2.2. GF2	13
2.3. GF3	14
2.4. GF4	15
2.5. GT1	16
2.6. GT2	16
2.7. GT3	17
3. Desarrollo	19
3.1. Fuentes de <i>tracks</i>	19
3.2. Fuentes de distribuciones	19

3.3. Datos de entrada	20
3.4. Desarrollos en el presente trabajo	20
3.5. Implementación de las herramientas de McStas	21
3.5.1. <i>EPA_DetectorX</i>	21
3.5.2. <i>Source_builderX</i>	25
4. Estudios previos	27
4.1. Análisis de influencia de la variable φ	27
4.2. Caracterización de los haces para la obtención de las fuentes de distri- buciones	30
4.2.1. GF1 y GF2	31
4.2.2. GF3 y GF4	35
4.2.3. GT1 y GT2	37
4.2.4. GT3 y GT4	40
4.3. Generación de las fuentes de distribuciones	42
5. Obtención de resultados en los puntos de utilización	47
5.1. GF1	48
5.2. GF2	50
5.3. Observaciones sobre GF1 y GF2	52
5.4. GF3	53
5.5. Observaciones sobre GF3	56
5.6. GF4	57
5.7. Observaciones sobre GF4	58
5.8. GT1	60
5.9. GT2	62
5.10. Observaciones sobre GT1 y GT2	63
5.11. GT3	64
5.12. Observaciones sobre GT3	66
6. Estudios complementarios	67
6.1. Detector de espectro en impulso	67
6.2. Detector de energía en función del número de colisiones	68
6.3. Detector del flujo absorbido a lo largo de la guía	71
7. Conclusiones	73
A. Cálculo de Magnitudes	75
B. Error estadístico en McStas	77

C. Actividades relacionadas a la Práctica Profesional Supervisada	79
D. Actividades de Proyecto y Diseño	81
Bibliografía	83
Agradecimientos	85

Índice de símbolos

- CR: Cara del reactor.
- E: Energía.
- GF: Haz Frío.
- GT: Haz Térmico.
- HG: Hall de guías.
- In-pile: Dentro del blindaje biológico. Si se habla de una guía *in-pile*, se hace referencia a una guía que está ubicada dentro del blindaje biológico.
- Out-of-pile: Fuera del blindaje biológico.
- Shutter: Obturador giratorio que actúa como blindaje para cerrar los haces.
- $\mu = \cos(\theta)$.

Índice de figuras

1.1. Reactor nuclear RA-10.	2
1.2. Guía de neutrones del fabricante <i>SwissNeutronics</i> [1].	4
1.3. Reflectividad en función de m para espejos con distintos m_c [1].	5
1.4. Código de un ejemplo de instrumento de McStas.	6
1.5. Instrumento típico de McStas.	7
1.6. Sistema de coordenadas de McStas y variables representativas.	7
1.7. Sistema de coordenadas de MCNP.	8
2.1. Esquema del RA-10.	11
2.2. Sistema de coordenadas intrínseco a la guía.	12
2.3. Distribución de componentes del haz GF1.	12
2.4. Distribución de componentes del haz GF2.	13
2.5. Distribución de componentes del haz GF3.	14
2.6. Características del haz GF3.	15
2.7. Distribución de componentes del haz GF4.	15
2.8. Distribución de componentes del haz GT1.	16
2.9. Distribución de componentes del haz GT2.	17
2.10. Distribución de componentes del haz GT3.	17
3.1. Posición de grabado de fuentes en el modelo de MCNP.	21
3.2. Descomposición del detector en cuatro detectores independientes, cada cual tiene la capacidad de determinar en forma detallada la distribución de la corriente en la última variable que puede discernir, mientras que el resto hacen las veces de variables de correlación.	24
3.3. Clasificación del neutrón según sus variables.	24
3.4. Intensidad en función de x para la fuente de tracks.	25
3.5. Generación de la distribución estadística.	26
4.1. Posición de los detectores en los haces GF1 y GT1.	28
4.2. Posición de los detectores en el haz GF3.	28
4.3. Posición de los detectores en el haz GT3.	28

4.4. F para los distintos casos de estudio para GF1.	28
4.5. F para los distintos casos de estudio para GF3.	29
4.6. F para los distintos casos de estudio para GT1.	29
4.7. F para los distintos casos de estudio para GT3.	29
4.8. Distribución en la variable φ para distintas posiciones sobre el detector.	30
4.9. Posición de grabado de fuentes en el modelo de MCNP.	31
4.10. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del conducto de extracción en GF1 y GF2.	33
4.11. Trazado de rayos en el conducto de extracción para las posiciones 1 y 2.	34
4.12. $J_{E1-E2}^+(x, y)$ discretizada en microzonas a la salida del conducto de extracción en GF1 y GF2.	34
4.13. Distribución espectral a la salida del conducto de extracción en GF1 y GF2.	35
4.14. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del conducto de extracción en GF3 y GF4.	36
4.15. Corte en el plano yz de trazado de rayos en el conducto de extracción para las posiciones 1 y 2.	36
4.16. $J_{E1-E2}^+(x, y)$ discretizada en microzonas a la salida del conducto de extracción en GF3 y GF4.	37
4.17. Distribución espectral a la salida del conducto de extracción en GF3 y GF4.	38
4.18. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del conducto de extracción en GT1 y GT2.	39
4.19. $J_{E1-E2}^+(x, y)$ discretizada en microzonas a la salida del conducto de extracción en GT1 y GT2.	39
4.20. Distribución espectral a la salida del conducto de extracción en GT1 y GT2.	40
4.21. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del conducto de extracción en GT3 y GT4.	41
4.22. $J_{E1-E2}^+(x, y)$ discretizada en microzonas a la salida del conducto de extracción en GT3 y GT4.	42
4.23. Distribución espectral a la salida del conducto de extracción en GT3 y GT4.	43
4.24. Ejemplo de instrumento para leer fuentes de tracks.	44
4.25. Ejemplo de instrumento para generar una fuentes de distribuciones.	45
5.1. Posiciones de experimento en GF1.	49
5.2. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GF1.	49

5.3. $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GF1.	50
5.4. Distribución espectral a la salida de la guía en GF1.	50
5.5. Posiciones de experimento en GF2.	50
5.6. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GF2.	51
5.7. $J_{E1-E2}^+(x', y')$ dicretizada en microzonas a la salida de la guía en GF2. .	51
5.8. Distribución espectral a la salida de la guía en GF2.	52
5.9. Posiciones de experimento en GF3.	53
5.10. Dependencia espacial y angular de la corriente en la posición de experimento 2 en GF3.	54
5.11. $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas en la posición de experimento 2 en GF3.	54
5.12. Distribución espectral en la posición de experimento 2 en GF3.	54
5.13. $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas en la posición de experimento 3 en GF3.	55
5.15. $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas en la posición de experimento 4 en GF3.	55
5.14. Dependencia espacial y angular de la corriente en la posición de experimento 4 en GF3.	56
5.16. Distribución espectral en la posición de experimento 4 en GF3.	56
5.17. Trazado de rayos para placas en posición de experimento 2 y 4.	57
5.18. Posiciones de experimento en GF4.	57
5.19. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GF4.	58
5.20. $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GF4.	59
5.21. Distribución espectral a la salida de la guía en GF4.	59
5.22. Posiciones de experimento en GT1.	60
5.23. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GT1.	61
5.24. $J_{300}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GT1. . .	61
5.25. Distribución espectral a la salida de la guía en GT1.	61
5.26. Posiciones de experimento en GT2.	62
5.27. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GT2.	62
5.28. $J_{300}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GT2. . .	63
5.29. Distribución espectral a la salida de la guía en GT2.	63
5.30. Posiciones de experimento en GT3.	64
5.31. Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del colimador en GT3.	65

5.32. $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida del colimador en GT3.	65
5.33. Distribución espectral a la salida del colimador en GT3.	66
6.1. J_i^+ / J_{iMax}^+ en función del m de los neutrones que atraviesan la guía. . .	68
6.2. Histogramas según número de colisiones dentro de las guías.	68
6.3. Espectros según el número de colisiones.	69
6.4. Espectros según el número de colisiones a la entrada y a la salida de la guía para GF1.	70
6.5. Espectros según el número de colisiones a la entrada y a la salida de la guía para GT1.	70
6.6. Ritmo de absorción lineal según el macrogrupo.	71
6.7. Longitud de no absorción (L_0).	71

Índice de tablas

1.1. Denominación, características y requerimientos de diseño de los haces. P: Placa neutrográfica.	4
2.1. Descripción de tramos del haz GF1.	13
2.2. Descripción de tramos del haz GF2.	13
2.3. Descripción de tramos del haz GF3.	14
2.4. Dimensiones de los componentes en GF3.	14
2.5. Descripción de tramos del haz GF4.	15
2.6. Descripción de tramos del haz GT1.	16
2.7. Descripción de tramos del haz GT2.	17
2.8. Descripción de tramos del haz GT3.	18
4.1. Magnitudes graficadas y calculadas en las salidas de los conductos de extracción.	32
4.2. Magnitudes calculadas para la fuente de tracks en la posición de salida del conducto de extracción común a GF1 y GF2.	33
4.3. Magnitudes calculadas para la fuente de tracks en la posición de salida del conducto de extracción común a GF3 y GF4.	35
4.4. Magnitudes calculadas para la fuente de tracks en la posición de salida del conducto de extracción común a GT1 y GT2.	38
4.5. Magnitudes calculadas para la fuente de tracks en la posición de salida del conducto de extracción común a GT3 y GT4.	40
4.6. Discretizaciones utilizadas en todas las variables y figura de mérito F . .	43
4.7. Parámetros de entrada de <i>EPA_DetectorX</i>	45
5.1. Magnitudes graficadas y calculadas en los puntos de utilización de los haces.	48
5.2. Magnitudes calculadas en GF1.	49
5.3. Magnitudes calculadas en GF2.	51
5.4. Magnitudes calculadas en GF3.	53
5.5. Magnitudes calculadas en GF4.	58

5.6. Magnitudes calculadas en GT1.	60
5.7. Magnitudes calculadas en GT2.	62
5.8. Magnitudes calculadas en GT3.	64

Resumen

En el presente trabajo se estudió el desempeño neutrónico de los haces fríos y térmicos del reactor RA-10. Dicho estudio involucró, por un lado, el desarrollo de herramientas de cálculo y, por otro, su implementación para la obtención de resultados de relevancia.

La etapa de desarrollo de herramientas consistió en la programación de componentes en el código McStas capaces de caracterizar en forma detallada el campo de neutrones y generar en base a tal información fuentes de distribuciones para su utilización en el cálculo de los haces.

Se obtuvieron resultados tanto integrales como distribucionales en los puntos de utilización de los haces corroborando el cumplimiento de todos los requerimientos de diseño.

Abstract

The present work was focused on the neutron performance of the cold and thermal beams of the RA-10 reactor. This work involved, on the one hand, the development of calculation tools and, on the other hand, its implementation to obtain relevant results.

The tool development stage consisted of programming components in McStas code capable of characterizing in detail the neutron field and generating, based on this information, distributional sources to be used in the calculation of these beams.

Both integral and distributional results were obtained at the endings of the beams confirming the fulfillment of the design requirements.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Reactor RA-10

La CNEA inició en el año 2010 la ejecución del proyecto de diseño, construcción y puesta en marcha del reactor nuclear multipropósito RA-10, cuyas principales funciones serán la producción de radiofármacos para uso medicinal, la investigación científica y las aplicaciones industriales. El sitio de emplazamiento del reactor será el Centro Atómico Ezeiza.

Este reactor es de tipo pileta y presenta las siguientes características: potencia nominal 30 MW, agua liviana como moderador y refrigerante en caudal ascendente, y agua pesada como reflector. El núcleo es de diseño compacto y posee 19 elementos combustibles dispuestos en una grilla de 5x5. Las posiciones restantes están ocupadas por facilidades de irradiación *in-core*. El combustible es de tipo MTR, posee 21 placas planas de aluminio con *meat* de siliciuro de Uranio y 20 alambres de Cadmio como venenos quemables. El reactor se opera con 6 barras de control de Hafnio. En la Figura 1.1 puede apreciarse un corte transversal horizontal del reactor.

El reactor cuenta con diversas facilidades, las cuales se clasifican según sean internas al núcleo (4 posiciones de irradiación con espectro de reactor y 2 con espectro térmico) o externas (aquellas insertadas en el reflector de agua pesada circundante). Entre estas últimas se encuentran:

- Dopaje de Silicio.
- Producción de Molibdeno-99 y otros radioisótopos.
- *Loop* de irradiación de elementos combustibles.
- Posiciones de irradiación con intercambiador neumático.
- Haz de neutrografía *in-pool*.

- Fuente Fría de Neutrones.
- Haces fríos y térmicos.

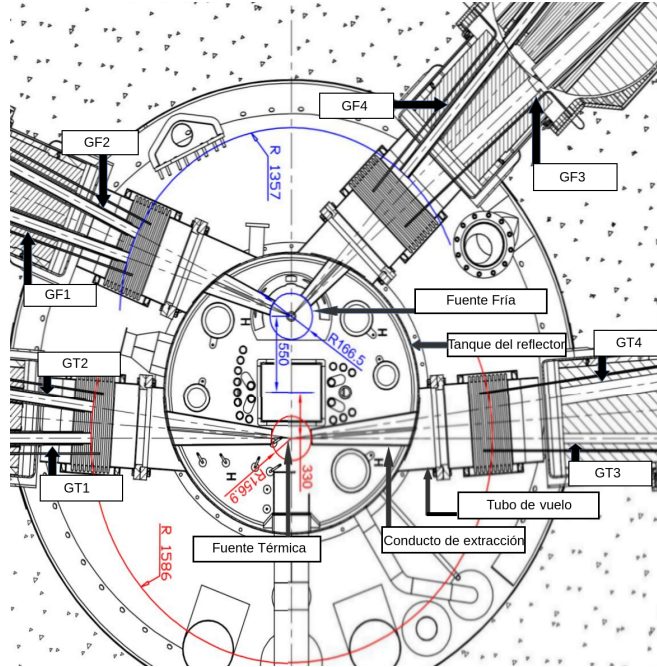


Figura 1.1: Reactor nuclear RA-10.

El foco de estudio del presente trabajo está centrado en los haces fríos y térmicos. Cabe destacar, que asociado a los haces de neutrones se encuentra en desarrollo el Proyecto LAHN (Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones). El mismo estará a cargo del diseño y construcción de instrumentos que permitan la utilización de dichos haces mediante diversas técnicas neutrónicas. En la actualidad, los instrumentos previstos y en desarrollo son un tomógrafo de neutrones fríos y un difractómetro de neutrones térmicos, los cuales se instalarán en la cara del reactor [2].

1.2. Fuentes fría, térmica y haces

Un haz de neutrones es una corriente neutrónica de baja divergencia. Dicha corriente es encausada mediante un conducto a fin de lograr transportar los neutrones para su posterior utilización en experimentos. El reactor RA-10 posee una fuente fría y una fuente térmica para la provisión de un amplio espectro de neutrones a ser utilizados en dichos haces.

La fuente fría consiste en un moderador de deuterio líquido a 23 K que “enfriá” el espectro de neutrones. Los neutrones provenientes del reflector sufren colisiones con el moderador frío y, como consecuencia, algunos de ellos emergen del evento de *scattering* con energías y direcciones deseables, que permiten su extracción a través de dos conductos de extracción.

La fuente térmica corresponde a una posición dentro del tanque del reflector ubicada aproximadamente a 10 cm del núcleo donde los neutrones moderados producen picos térmicos cuyo espectro es maxwelliano con $kT = 27 \text{ meV}$. Cercano a uno de estos picos térmicos se colocan dos conductos de extracción.

Los conductos de extracción son compartimentos cuyas paredes son de zircalloy y están rellenos de helio. Dichos conductos poseen una sección transversal vertical rectangular cuyo ancho aumenta a medida que se incrementa la distancia con respecto a la fuente, como puede apreciarse en la Figura 1.1. A diferencia del ancho variable, la altura de dichos conductos permanece constante a lo largo del conducto. Estos conductos permiten que los neutrones viajen con muy baja probabilidad de colisión desde la entrada de los conductos hasta la salida. Luego, los neutrones siguen su trayectoria a través de tubos de vuelo que se insertan en el tanque de agua liviana, que comunican la salida de los conductos de extracción con la entrada a las guías y colimadores.

El reactor cuenta con ocho haces de neutrones, cuatro fríos (GF1, GF2, GF3 y GF4) y cuatro térmicos (GT1, GT2, GT3 y GT4). Dos haces térmicos (GT3 y GT4) y dos haces fríos (GF3 y GF4) están destinados a su uso en el hall del reactor (sobre la cara del reactor), mientras que el resto se dirigen hacia el hall de guías. Estos últimos poseen guías de neutrones (véase Sección 1.4) que permiten la instalación de experimentos en posiciones lejanas a la fuente ($\sim 60\text{m}$).

Los haces en la cara del reactor no prevén la utilización de guías de neutrones, con excepción del haz GF4. A su vez, el haz GT4 no será utilizado en forma inmediata, por lo que inicialmente se colocará un tapón-blindaje dentro del orificio in-pile y porción asociada del obturador primario [3].

En la Tabla 1.1 se presenta la denominación de los haces, sus características principales y los requerimientos de diseño a satisfacer por los mismos [4]. Los requerimientos de diseño para el haz GF3 se encuentran asociados al tipo de facilidad a instalarse en dicho haz, un neutrógrafo. Para este caso particular la posición en la que se especifica el requerimiento (identificada como “P”) corresponde a una placa neutrográfica que se encuentra más allá de la cara del reactor.

1.3. Objetivos

- Comprender las propiedades de los instrumentos ópticos presentes en los haces y los efectos de los mismos sobre las distribuciones neutrónicas.
- Este trabajo tiene como finalidad principal caracterizar en forma adecuada el flujo neutrónico en cada uno de los haces del reactor en distintos puntos de utilización.
- Asimismo, representa un objetivo de este trabajo desarrollar las herramientas de cálculo neutrónico necesarias para tal fin.

Tabla 1.1: Denominación, características y requerimientos de diseño de los haces. P: Placa neutrográfica.

Haz	Características	Lugar de Aplicación	Nivel mínimo de flujo [$n/(cm^2 s)$]	Condiciones
GF1	Con guías de neutrones.	HG	10^9	$E < 10meV$
GF2	Con guías de neutrones.			
GF3	Colimador sin guía, compatible con facilidad de neutrografía.	P	10^8	para $L/D \sim 200$
GF4	Con guías de neutrones.	CR	4×10^9	$E < 10meV$
GT1	Con guías de neutrones.	HG	10^9	$E < 100meV$
GT2	Con guías de neutrones.			
GT3	Colimador sin guía.	CR	10^{10}	
GT4	Con tapón-blindaje.			

1.4. Guías de neutrones

Una guía de neutrones puede definirse como un conducto en cuyas paredes internas se alojan espejos de neutrones. Dichos espejos poseen la capacidad de reflejar cierta calidad de neutrones. Al estar el interior de las guías sometido al vacío, los neutrones sólo colisionan con sus paredes, conservando en dicha colisión tanto la energía como el ángulo con el cual incidieron, en forma especular. La capacidad que estas presentan de reflejar los neutrones es conocida como reflectividad, la cual representa la probabilidad que tienen los neutrones incidentes de ser reflejados. Un ejemplo de guía puede verse en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Guía de neutrones del fabricante *SwissNeutronics* [1].

La reflectividad de estos espejos viene determinada en función de la variable característica Q , la cual es el cambio en la componente normal del impulso del neutrón al

colisionar con dicha superficie. Esta variable, puede determinarse mediante la expresión:

$$Q \left(\text{\AA}^{-1} \right) = 1,3894 \sqrt{E(\text{meV})} \sin(\theta) \quad (1.1)$$

donde θ es el ángulo de impacto, comprendido entre la trayectoria del neutrón y el plano del espejo. De esta forma, la reflectividad puede ser representada como una función de Q . Esta exhibe una zona de probabilidad constante aproximadamente igual a 1 para valores bajos de Q (menores a 0.0219\AA^{-1}), luego una disminución lineal cuya pendiente se denomina “alpha - α ” y finalmente un flanco en el que la función se hace prácticamente 0. El valor de Q en el que comienza este flanco se lo conoce como “ Q crítico” (Q_c). También se define usualmente la siguiente variable:

$$m = Q/Q_{c-Ni} \quad (1.2)$$

donde Q_{c-Ni} corresponde al valor de Q_c para el níquel puro, que se toma frecuentemente como caso de referencia. A su vez, se conoce como “ m de un espejo neutrónico” (m_c) al valor de m asociado a Q_c [4]. En la Figura 1.3, se observa un diagrama de reflectividad en función de m para distintos espejos del fabricante *SwissNeutronics*.

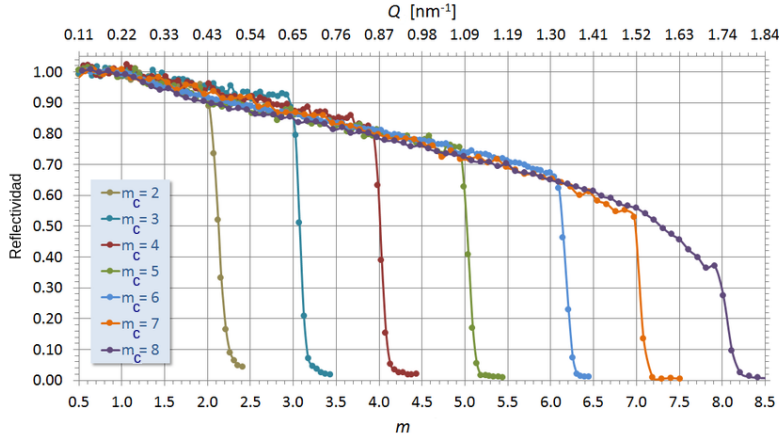


Figura 1.3: Reflectividad en función de m para espejos con distintos m_c [1].

Además, existen guías con un cierto grado de curvatura, conocidas como guías curvas, las cuales se componen de sucesivos tramos rectos. Estos tramos presentan una leve rotación entre sí a fin de reproducir el comportamiento de una única guía con una curvatura característica. Mediante este tipo de guías es posible eliminar la considerable componente de radiación gamma que acompaña al campo de neutrones. Adicionalmente, la curvatura en la guía elimina la componente neutrónica de altas energías.

1.5. McStas

Dada la necesidad de estudiar en forma detallada los haces, fue necesario emplear una herramienta de simulación capaz de modelar guías de neutrones. Las simulaciones neutrónicas comúnmente se realizan utilizando el código MCNP. Sin embargo, para este estudio en particular dicho código no presenta la capacidad requerida, por lo que se empleó una herramienta diferente. De esta forma, la herramienta seleccionada fue McStas debido a su amplia gama de instrumentos ópticos ya disponibles. Así, la herramienta presenta componentes como colimadores, espejos y guías de neutrones, monocromadores y *choppers*, entre otros. A su vez, McStas es un programa de código abierto cuyo lenguaje de programación es C, lo cual otorga cierta facilidad para incorporar nuevos desarrollos realizados por el usuario.

A fin de explicar el funcionamiento de esta herramienta de simulación de transporte por *Monte Carlo* de neutrones, se presenta un *input* básico, mejor conocido como “instrumento” en la Figura 1.4. Este instrumento presenta tres “componentes”: el primero simula una fuente de neutrones, el segundo es una guía y el tercero es un detector, representado por una placa con la capacidad de clasificar los neutrones que lo atraviesan.

```

DEFINE INSTRUMENT p0()

TRACE
COMPONENT Fuente=Source_simple(yheight=0.3,xwidth=0.05,dist=0.05,focus_xw=0.1,focus_yh=0.1,E0=5,dE=2) AT(0,0,0) ABSOLUTE

COMPONENT Guia=Guide(w1=0.05,h1=0.3,w2=0.05,h2=0.3,l=2,m=2) AT(0,0,0.5) RELATIVE Fuente

COMPONENT Detector=PSD_monitor(nx=90,ny=90,yheight=0.3,xwidth=0.05) AT(0,0,3) RELATIVE Fuente

END

```

Figura 1.4: Código de un ejemplo de instrumento de McStas.

Para definir los componentes, es preciso asignar valores a los parámetros que los caracterizan. Todos los parámetros que representan una longitud son especificados en metros. Para el caso de energías, se especifican en *meV*. La fuente empleada en este ejemplo fue *Source_simple*, la cual genera neutrones en una placa de 5 cm de ancho y 30 cm de alto y los focaliza sobre un área de 10 cm de ancho y 10 cm de alto ubicada a 5 cm de la primera placa. Los neutrones generados poseen una energía uniformemente distribuida entre 3 y 7 meV. Las guías de neutrones fueron generadas mediante el componente *Guide*, el cual corresponde a una guía de 2 metros de largo cuya sección es de 5 cm de ancho y 30 cm de alto en toda su longitud. El m_c de la guía es 2. El detector empleado fue *PSD_monitor*, el cual detecta los neutrones que pasan por una placa de 5 cm de ancho y 30 cm de alto y posee una discretización de 90 intervalos en x y en y .

McStas sitúa los componentes a lo largo del eje z , como puede notarse en la Figura 1.5. A su vez, esta figura presenta el esquema del ejemplo de instrumento con la ubicación de los componentes respecto al sistema de coordenadas expresada en metros.

Puede apreciarse la disposición del instrumento, donde la fuente está ubicada en el origen, la guía a 50 cm de la fuente y el detector a 50 cm de la salida de la guía.

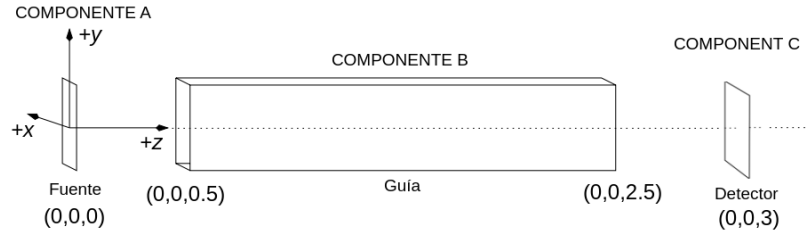


Figura 1.5: Instrumento típico de McStas.

El estado del neutrón en McStas queda definido mediante las siguientes variables:

- De posición: x , y , z .
- De dirección: v_x , v_y , v_z .
- De spin: s_x , s_y , s_z .
- Peso estadístico: p .
- Tiempo: t .

Para poder hacerlo, McStas utiliza el sistema de coordenadas previamente mencionado. En la Figura 1.6, se observa nuevamente el sistema de coordenadas junto a las variables más importantes a la hora de caracterizar un neutrón con dirección de vuelo $\vec{\Omega}$. Mediante las variables θ y φ se puede describir el versor $\hat{\Omega}$ de forma tal que

$$\hat{\Omega} = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta). \quad (1.3)$$

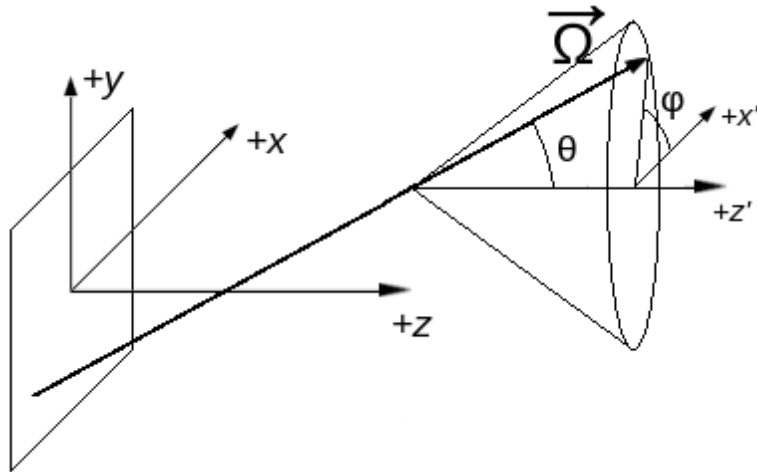


Figura 1.6: Sistema de coordenadas de McStas y variables representativas.

1.5.1. MCNP vs McStas

Para caracterizar el estado de los neutrones, MCNP emplea otro sistema de variables, que se detalla a continuación:

- De posición: x, y, z .
- De dirección: d_x, d_y, d_z .
- Energía: E .
- Peso estadístico: W .
- Tiempo: t .

Mientras que McStas sitúa su eje z en dirección del experimento, MCNP, para el caso del RA-10, posiciona su eje z , en la dirección vertical ascendente, es decir, en la dirección saliente respecto al corte del reactor mostrado en la Figura 1.1.

Para esquematizar esto, en la Figura 1.7 se indican las variables de posición y dirección empleadas en MCNP.

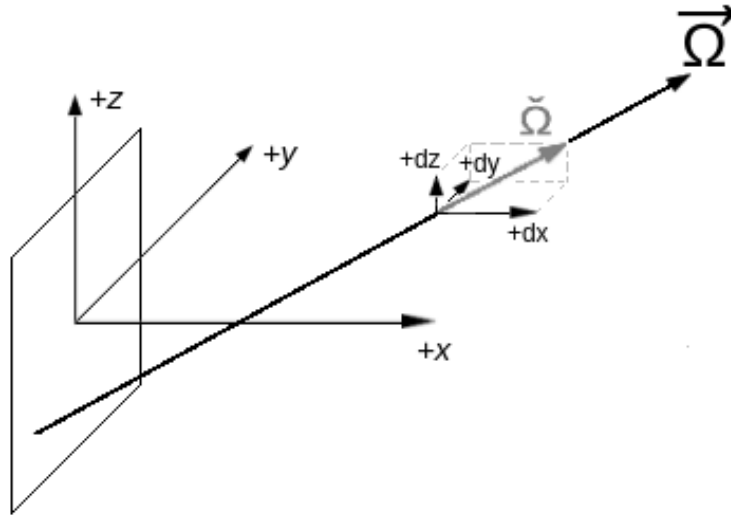


Figura 1.7: Sistema de coordenadas de MCNP.

Además de la limitación sobre el modelado de guías de neutrones, MCNP no tiene componentes con la capacidad de generar fuentes de distribuciones que tengan en cuenta la variable azimutal φ (véase Sección 3.2). A lo largo del trabajo se observó la importancia relativa que presenta dicha variable a la hora de llevar a cabo los estudios pertinentes.

1.5.2. Implementación de McStas

Se debió generar una serie de componentes con objeto de poder trabajar en el desarrollo del problema en cuestión. Los principales componentes de McStas programados fueron *EPA_DetectorX* y *Source_builderX*. Ambos trabajan en conjunto para generar fuentes de distribuciones de neutrones a partir de una fuente de tracks proveniente de MCNP. Los detalles de la implementación de dichas herramientas se exhiben en el Capítulo 3.

Además se programaron otros componentes, los cuales fueron añadidos a la biblioteca original del programa:

- *Isotropic_Source*: Fuente plana de dimensiones *yheight* de alto y *xwidth* de ancho. Esta fuente es uniforme, isotrópica y su energía está distribuida uniformemente en un intervalo de energía $[E0;E1]$.
- *Directed_Source*: Esta fuente es prácticamente idéntica a la descrita anteriormente. La única salvedad es con respecto a θ , el cual está confinado a un valor entre cero y un máximo. Dentro de estos valores, μ se encuentra uniformemente distribuido.
- *Guide_m*: Este componente es una guía recta de neutrones capaz de clasificar los neutrones que la atraviesan según su correspondiente m . Otra virtud que presenta este componente, es clasificar los neutrones según el número de colisiones dentro de la guía y su energía. De esta forma, permite conocer la distribución en energías según el número de colisiones dentro del componente, para los neutrones que lo atraviesan. Además, posee la capacidad de medir el ritmo de neutrones absorbidos en la guía, para distintos rangos de energías.
- *Guide_channeled_m*: Este componente es una guía de neutrones, a la cual es posible asignarle características diferentes a los distintos espejos que la componen. Salvo este último punto, el componente presenta las mismas atribuciones que el anterior.
- *Ang_monitor*: Este detector permite conocer la distribución en θ de los neutrones que lo atraviesan.
- *Phi_monitor*: Similar a *Ang_monitor*, este detector es capaz de informar la distribución en la variable azimutal φ que presentan los neutrones al momento de atravesarlo.

Capítulo 2

Descripción de los haces

Como se mencionó en la sección previa, el reactor RA-10 contará con 8 haces de neutrones. Estos haces comprenden desde las fuentes hasta los puntos de utilización de dichos haces. En la siguiente figura, se puede observar los primeros segmentos que componen a cada uno de ellos.

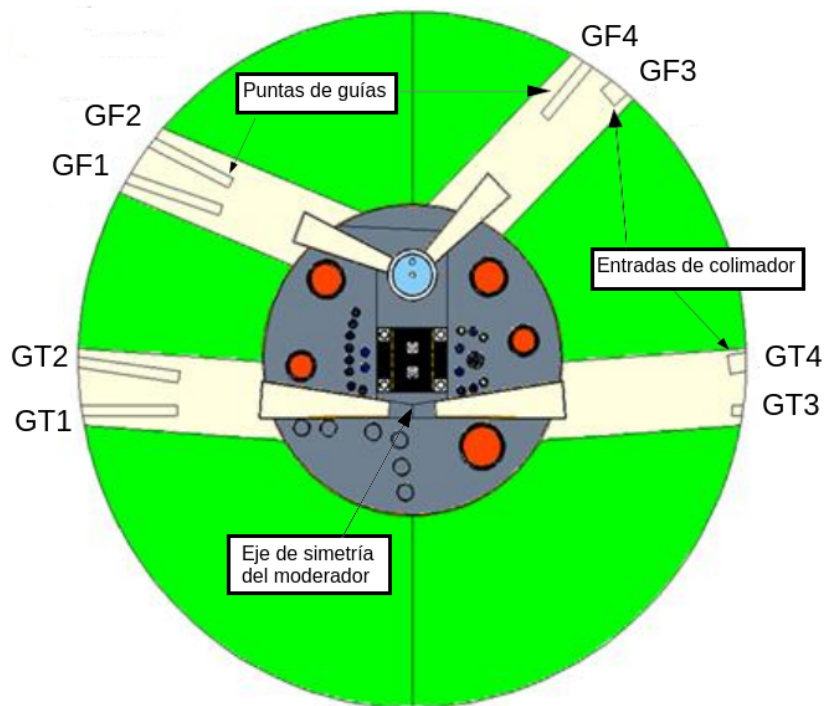


Figura 2.1: Esquema del RA-10.

A continuación se brinda una descripción más detallada de cada uno de los haces. Para los casos que presentan guías, se utilizó un sistema de referencia (x', y', z') de tipo intrínseco, con el eje z' siguiendo la forma de la guía sobre su eje principal, ver Figura 2.2. En esta figura también son apreciables cada uno de los espejos que conforman la guía. En los casos en que no hay guías, se utiliza también un sistema de referencia (x', y', z') , donde z' corresponde a la dirección principal del experimento.

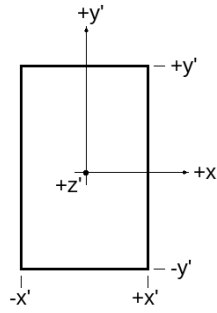


Figura 2.2: Sistema de coordenadas intrínseco a la guía.

A esta altura cabe mencionar que el detalle de calidad de guías, geometría de conductos y *layout* final de los haces quedará determinado por el proyecto Haces RA-10. Por lo tanto, no todas las especificaciones que se darán a continuación permanecen sin variaciones. Por ejemplo, la geometría del colimador para el tomógrafo de neutrones a instalar en GF3 no será la que se presenta en este trabajo. Sin embargo, este último se enfoca en el desarrollo de herramientas de uso general que quedarán disponibles para el cálculo de los instrumentos en su versión final. En particular y como se mostrará en las secciones siguientes, la tarea de generar las fuentes de neutrones se realiza sobre superficies previas al ingreso a cualquier guía o colimador, por lo que la modificación de estos últimos no afectaría significativamente a las fuentes ya generadas.

2.1. GF1

El haz GF1 está compuesto por los elementos indicados en la Figura 2.3. En esta representación, “A” corresponde a un tramo entre el centro de la fuente fría y la entrada de la guía in-pile, “B”, “C” y “E” a una guía recta y “D” a una guía curva. “D” y “E” son guías out-of-pile. La guía presenta en toda su extensión una sección rectangular de 7 cm de ancho y 20 cm de alto.

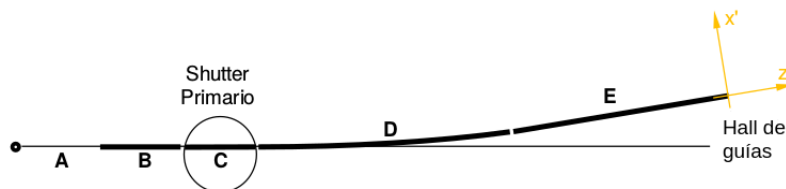


Figura 2.3: Distribución de componentes del haz GF1.

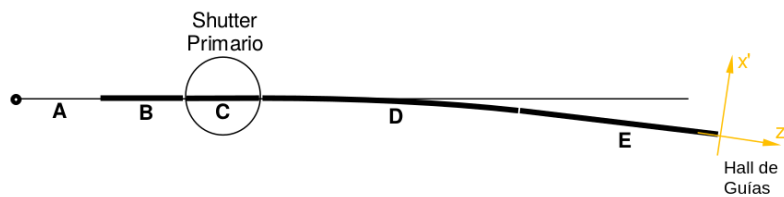
En la Tabla 2.1, se encuentra una descripción más detallada de cada uno de los componentes del haz. Se puede observar en la Figura 2.2, cada uno de los espejos.

Tabla 2.1: Descripción de tramos del haz GF1.

Tramo	Longitud[m]	m espejos				Radio de curvatura [m]	Descripción
		$+x'$	$-x'$	$+y'$	$-y'$		
A	1.357	-				-	Distancia del centro de la fuente fría a la entrada de la guía in-pile.
B	3.000 (B+C)	3	3	3	3	-	Guía de neutrones recta.
C						-	
D	20.200	3	3.5	3	3	929 cóncavo $+x'$	Guía de neutrones curva.
E	32.000	3.5	3.5	3	3	-	Guía de neutrones recta.

2.2. GF2

El haz GF2 está conformado por los segmentos indicados en la Figura 2.4. Para los tramos “A”, “B”, “C” y “E” la descripción es la misma que para GF1. En cambio, el tramo “D” corresponde a una guía curva pero cóncava en el sentido opuesto. La guía presenta en toda su extensión una sección rectangular de 7 cm de ancho y 20 cm de alto.

**Figura 2.4:** Distribución de componentes del haz GF2.

En la Tabla 2.2, se encuentra una descripción más detallada de cada uno de los componentes del haz.

Tabla 2.2: Descripción de tramos del haz GF2.

Tramo	Longitud[m]	m espejos				Radio de curvatura [m]	Descripción
		$+x'$	$-x'$	$+y'$	$-y'$		
A	1.357	-				-	Distancia del centro de la fuente fría a la entrada de la guía in-pile.
B	3.000 (B+C)	3	3	3	3	-	Guía de neutrones recta.
C						-	
D	20.200	3	3.5	3	3	929 cóncavo $-x'$	Guía de neutrones curva.
E	32.000	3.5	3.5	3	3	-	Guía de neutrones recta.

2.3. GF3

El haz GF3 está compuesto por los elementos mostrados la Figura 2.5. En esta representación, “A” corresponde a un tramo entre la entrada del conducto de extracción y la entrada del colimador, “B” a un colimador in-pile y “C” a un colimador dentro del shutter primario. El colimador presenta en toda su extensión una sección cuadrada, abriéndose para z' creciente con una divergencia horizontal y vertical de igual magnitud. Este colimador fue diseñado para iluminar de forma uniforme una placa de 40 cm de lado a 18 metros de la fuente. Además se considera una placa intermedia colocada a 9 metros de la fuente, de 16.4 cm de lado.

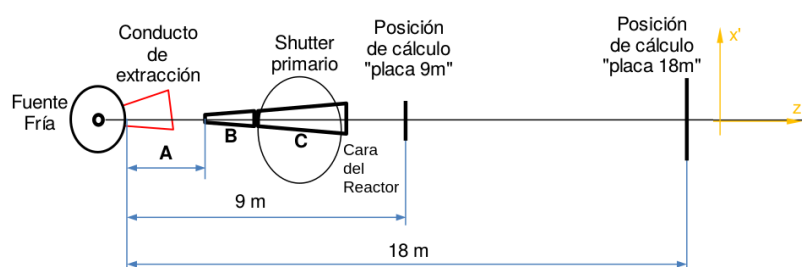


Figura 2.5: Distribución de componentes del haz GF3.

En la Tabla 2.3 y Tabla 2.4, se encuentra una descripción más detallada de cada uno de los componentes del haz.

Tabla 2.3: Descripción de tramos del haz GF3.

Tramo	Longitud [m]	Descripción
A	1.574	Distancia entre la superficie de entrada del conducto de extracción a la entrada del colimador.
B	2.350 (B+C)	Colimador in-pile.
C		Colimador en shutter primario.

Tabla 2.4: Dimensiones de los componentes en GF3.

Componente	Ancho [cm]	Altura [cm]
Entrada Colimador “B”	3.45	3.45
Salida Colimador “C”	8.75	8.75
Placa 9 m	16.40	16.40
Placa 18 m	40	40

En la Figura 2.6, se presentan los parámetros “D” y “L” del haz. El tamaño de fuente ópticamente disponible para cada uno de los puntos de la placa es el denominado D y

L se refiere a la distancia entre la fuente y la placa. El cociente L/D se asocia a una divergencia característica que percibe cada punto de la placa [4].

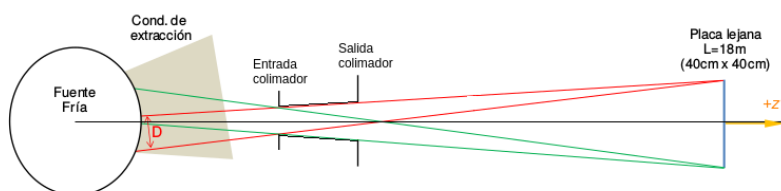


Figura 2.6: Características del haz GF3.

2.4. GF4

Al haz GF4 lo componen los elementos mostrados en la Figura 2.7. En esta representación, “A” corresponde a un tramo entre el centro de la fuente fría y la entrada de la guía in-pile, “B” y “C” corresponden a guías rectas que presentan una separación de 4 mm. La guía presenta en toda su extensión una sección rectangular de 7 cm de ancho y 20 cm de alto.

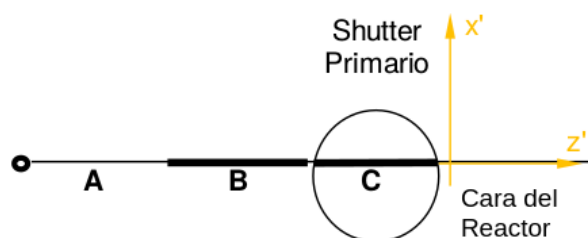


Figura 2.7: Distribución de componentes del haz GF4.

En la Tabla 2.5, se encuentra una descripción más detallada de cada uno de los componentes del haz.

Tabla 2.5: Descripción de tramos del haz GF4.

Tramo	Longitud [m]	m espejos				Descripción
		$+x'$	$-x'$	$+y'$	$-y'$	
A	1.357	-				Distancia del centro de la fuente fría a la entrada de la guía in-pile.
B	1.200	3	3	3	3	Guía de neutrones recta.
C	1.422	3	3	3	3	Guía de neutrones recta.

2.5. GT1

El haz GT1 está compuesto por los elementos indicados en la Figura 2.8. En esta representación, “A” corresponde a un tramo entre el eje de simetría del moderador y la entrada de la guía in-pile, “B”, “C” y “E” a una guía recta y “D” a una guía curva. “D” y “E” son guías out-of-pile. La guía presenta en toda su extensión una sección rectangular de 7 cm de ancho y 30 cm de alto.

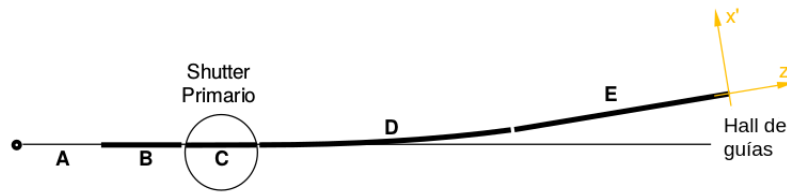


Figura 2.8: Distribución de componentes del haz GT1.

En la Tabla 2.6, se encuentra una descripción más detallada de cada uno de los componentes del haz.

Tabla 2.6: Descripción de tramos del haz GT1.

Tramo	Longitud[m]	n espejos				Radio de curvatura [m]	Descripción
		$+x'$	$-x'$	$+y'$	$-y'$		
A	1.586	-				-	Distancia del eje de simetría del moderador a la entrada de la guía in-pile.
B	3.000	3.5	3.5	3	3	-	Guía de neutrones recta.
C	(B+C)					-	
D	42.000	3	3.5	3	3	3550 cóncavo $+x'$	Guía de neutrones curva.
E	20.000	4	4	3	3	-	Guía de neutrones recta.

2.6. GT2

El haz GT2 está conformado por los elementos mostrados en la Figura 2.9. Para los tramos “A”, “B”, “C” y “E” la descripción es la misma que para GT1. En cambio, el tramo “D” corresponde a una guía curva pero cóncava en el sentido opuesto. La guía presenta en toda su extensión una sección rectangular de 7 cm de ancho y 30 cm de alto.

En la Tabla 2.7, se encuentra una descripción más detallada de cada uno de los componentes del haz.

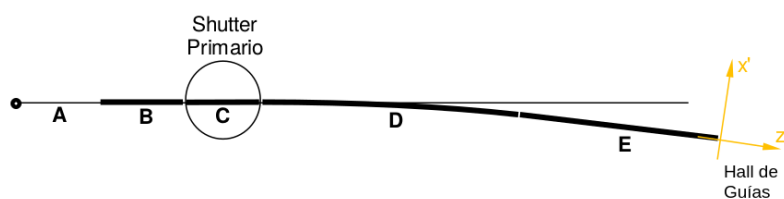


Figura 2.9: Distribución de componentes del haz GT2.

Tabla 2.7: Descripción de tramos del haz GT2.

Tramo	Longitud[m]	n espejos				Radio de curvatura [m]	Descripción
		$+x'$	$-x'$	$+y'$	$-y'$		
A	1.586	-				-	Distancia del eje de simetría del moderador a la entrada de la guía in-pile.
B	3.000 (B+C)	3.5	3.5	3	3	-	Guía de neutrones recta.
C						-	
D	42.000	3	3.5	3	3	3550 cóncavo $-x'$	Guía de neutrones curva.
E	20.000	4	4	3	3	-	Guía de neutrones recta.

2.7. GT3

El haz GT3 está compuesto por los elementos que se indican en la Figura 2.10. En esta representación, “A” corresponde a un tramo entre el eje de simetría del moderador y la entrada de la guía in-pile, “B” y “C” corresponden a un colimador recto que puede considerarse como un tramo único. El colimador presenta en toda su extensión una sección rectangular de 7 cm de ancho y 15 cm de alto.

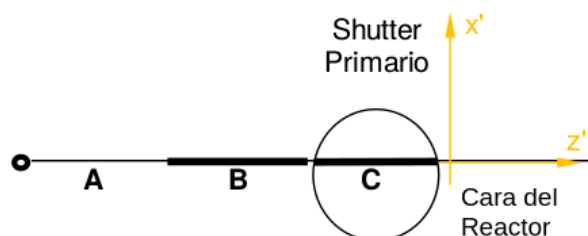


Figura 2.10: Distribución de componentes del haz GT3.

En la Tabla 2.8, se encuentra una descripción más detallada de cada uno de los componentes del haz.

Tabla 2.8: Descripción de tramos del haz GT3.

Tramo	Longitud [m]	Descripción
A	2.1518	Distancia del eje de simetría del moderador a la entrada del colimador in-pile.
B	2.350 (B+C)	Colimador in-pile.
C		Colimador en shutter primario.

Capítulo 3

Desarrollo

En este capítulo se describen los componentes *EPA_DetectorX* y *Source_builderX* que trabajan en conjunto para generar las fuentes de distribuciones de todos los haces analizados. Asimismo se describe el proceso de cálculo en su totalidad, es decir, qué datos previos provenientes de otras simulaciones son incorporados para continuar el cálculo de Monte Carlo en McStas (fuentes de *tracks*) y cómo se utilizan en conjunto con las herramientas desarrolladas para generar las fuentes.

3.1. Fuentes de *tracks*

Una fuente de *tracks* es aquella que guarda, para cada partícula que atraviesa la superficie de interés, toda la información de las variables que la determinan. Dichas fuentes pueden ser luego “leídas” en MCNP para continuar el Monte Carlo en una geometría adyacente, o bien, ser transformadas al formato PTRAC mediante una corrida adicional de MCNP, que es luego utilizado para continuar el Monte Carlo de neutrones en McStas. Esto último se logra utilizando componentes de McStas que leen el formato PTRAC e introducen los neutrones de este archivo como fuente en el instrumento.

Fue necesario modificar el código fuente del componente preexistente de McStas *Virtual_mcnp_input*, con el fin de lograr una correcta alineación del haz y adecuación de variables [4].

3.2. Fuentes de distribuciones

Se conoce como fuente de distribuciones a aquella en la que se utiliza el conocimiento previo de la distribución estadística (espectral, espacial y angular) que poseen los neutrones en una determinada posición, para generar los neutrones de fuente en una simulación de Monte Carlo. Esta información estadística se obtiene generalmente a partir de simulaciones previas. En el caso del RA-10 estas simulaciones previas son las que

hacen uso de las fuentes de tracks descritas en la sección anterior. Entonces, en base a la información estadística de estas fuentes, se generan las fuentes de distribuciones.

Ahora bien, cabe mencionar que las fuentes de tracks grabadas resultan suficientes para obtener resultados integrales en las posiciones de utilización de los haces. También es posible obtener a partir de ellas la información estadística para la generación de fuentes de distribuciones dentro de un grado de detalle razonable. Sin embargo, las fuentes de tracks no resultan suficientes para el cálculo y caracterización detallada (distribuciones espectrales, espaciales y angulares) a la salida de guías y conductos. De ahí surge la necesidad de generar estas fuentes de distribuciones [4]. Es decir, la estadística de las fuentes de tracks no es suficiente para caracterizar en forma detallada los haces, por lo tanto, se recurre a generar fuentes con la misma distribución estadística, a fin de poder caracterizar en forma adecuada los haces.

3.3. Datos de entrada

Como datos de entrada para la generación de fuentes de distribuciones mediante la utilización de los componentes de McStas programados en este trabajo, se utilizaron fuentes de *tracks* previamente calculadas en MCNP para el Proyecto RA-10. Dichas fuentes fueron provistas sobre las superficies de salida de los cuatro conductos de extracción, las cuales se muestran en la Figura 3.1. A su vez, se utilizó el componente *Ptrac_source_difra* que permite la lectura de estas fuentes en McStas, también desarrollado en forma previa para el Proyecto.

3.4. Desarrollos en el presente trabajo

A continuación se lista la serie de tareas llevadas a cabo:

- Desarrollo de una herramienta de McStas para la obtención de la información estadística de las fuentes de *tracks*.
- Generación de instrumentos de McStas que incluyan las fuentes de *tracks* y el modelado de los sistemas de guías y colimadores para la obtención de la información estadística de dichas fuentes mediante el uso de la herramienta desarrollada en el punto anterior.
- Generación de una fuente de distribuciones adecuada para cada haz, a partir del desarrollo de una herramienta capaz de adecuar la información estadística obtenida en el punto anterior.

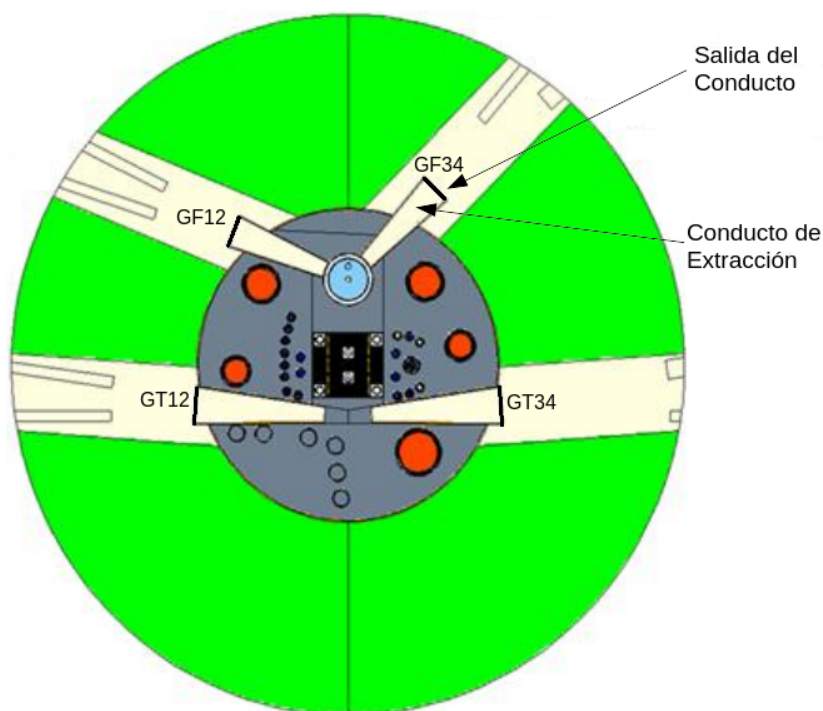


Figura 3.1: Posición de grabado de fuentes en el modelo de MCNP.

- Generación de instrumentos de McStas que incluyan las fuentes de distribuciones y el modelado de los sistemas de guías y colimadores para la obtención de resultados integrales y distribucionales en los puntos de utilización de los haces.

3.5. Implementación de las herramientas de McStas

Como se mencionó en la Sección 1.5, los componentes *EPA_DetectorX* y *Source_builderX* son, en conjunto, los responsables de generar las fuentes de distribuciones. Así, el primero lee la información estadística generada por la fuente de *tracks* y luego el segundo, la reproduce como una fuente de distribuciones.

3.5.1. *EPA_DetectorX*

Para conocer el valor de la corriente I en una dada superficie, McStas identifica a las partículas que la atraviesan y suma sus correspondientes pesos estadísticos p_i . Es decir,

$$I = \sum_{i=0}^N p_i \quad (3.1)$$

Para normalizar la corriente de neutrones a la intensidad de operación, se debe

recurrir a la relación:

$$J^+[\frac{n}{s}] = \frac{I \cdot FP}{NPS} \quad (3.2)$$

donde FP corresponde a un factor de escala dado por la cantidad de neutrones nacidos de fisión por segundo. Para el caso de estudio, a Potencia nominal de 30 MW, este valor es igual a $2.3 \times 10^{18} \frac{n}{s}$. NPS corresponde a la cantidad de partículas corridas en la simulación de MCNP que dio origen a la fuente de *tracks* utilizada, el cual toma un valor de 3.9×10^9 .

La utilidad del detector reside en caracterizar la corriente, a fin de conocer su distribución espectral, espacial y angular. La corriente detectada puede expresarse en función de estas variables $J^+(E, x, y, \mu, \varphi)$. Luego, para poder generar neutrones con la misma distribución estadística se debe hallar $p(E, x, y, \mu, \varphi)$ que está vinculada a la anterior mediante la siguiente relación:

$$J^+(E, x, y, \mu, \varphi) = J_T^+ \cdot p(E, x, y, \mu, \varphi) \quad (3.3)$$

donde J_T^+ representa la integral de J^+ en todas sus variables, es decir, J_T^+ representa la corriente total que atravesó al detector. Por otro lado, p es una distribución normalizada con unidades $(cm^2.meV.sr)^{-1}$. A fin de poder clasificar un neutrón en energía, posición y ángulo, todas esas variables se encuentran discretizadas en intervalos.

Para poder explicar mejor esto, se presenta el siguiente ejemplo. La discretización utilizada puede ser *gruesa* (o *de correlación*), o bien *fin*. Las discretizaciones de correlación tienen como fin último la descripción fina de otra variable. Por ejemplo, para describir el espectro de neutrones como función del ángulo, es decir, $J^+(\mu, E)$, para cada neutrón que atraviesa la superficie de interés se identifica dónde se sitúa el μ del neutrón dentro de la grilla generada por la clasificación gruesa en dicha variable y luego, se ubica su energía dentro de una grilla fina. De esta forma, se genera una dependencia entre la energía y el ángulo de incidencia. Un ejemplo físico de esta situación es el caso de la salida del conducto de extracción frío, como se verá en el Capítulo 4. A bajos ángulos respecto a la dirección principal del haz, se observan neutrones fríos provenientes de la entrada de dicho conducto. A ángulos mayores, se observa un espectro más caliente correspondiente a neutrones que provienen de los laterales del conducto. Como consecuencia de que los primeros se presentan en mayor intensidad que los segundos, la discretización gruesa en la variable μ debe volverse más espaciada hacia la dirección perpendicular al haz, sobre todo cuando se desea obtener con buena estadística un espectro de detalle asociado a dichos ángulos.

El caso del ejemplo pretende describir el proceso de discretización en forma más simple debido a que su foco de estudio es J^+ descripta solamente en función de las variables μ y E . Volviendo al caso de estudio, se cuenta con las 5 variables mencionadas anteriormente. De forma tal que si se cuenta con N_E intervalos en E , N_x en x , N_y en

y , N_μ en μ y N_φ en φ , la intensidad J^+ se encuentra dividida en $N_E \cdot N_x \cdot N_y \cdot N_\mu \cdot N_\varphi$ intervalos. Notar que un neutrón incidente contribuye a una muy baja porción de la J_T^+ . Esto permite tener una idea de la magnitud de cantidad de partículas mínima necesaria para poder detallar adecuadamente J^+ .

Con motivo de sortear la limitación frecuente en el cálculo de Monte Carlo, que es la estadística y poder reducir la cantidad de partículas necesarias para lograrla, se disminuye la cantidad de discretizaciones en todas las variables, menos en la que se busca tener una buena descripción. Así, para obtener en forma detallada la distribución en φ se discretiza dicha variable en la cantidad de intervalos necesaria para lograrlo (no se impone una restricción sobre N_φ). Dicho de otro modo, tal variable es discretizada de una forma tan *fin*a como se quiera. En cambio, el resto de las variables son discretizadas con menor número de intervalos, ya no para conocer su distribución sino para permitir mantener una correlación entre esas variable y φ . Por lo tanto, se discretiza todas las variables en una forma gruesa, salvo φ .

Como es necesario imponer una restricción en la cantidad de intervalos, sólo se podría conocer con buen detalle la distribución en una de las variables. Para salvar esta limitación, el detector bajo estudio se descompone en 4 detectores independientes entre sí. Donde el primer detector, caracteriza muy bien la corriente en función de φ , es decir, lee $J^+(E, x, y, \mu, \varphi)$. El segundo detector, ya deja de necesitar la capacidad de discriminar en φ , por lo que lee $J^+(E, x, y, \mu)$. Este permite caracterizar muy bien la corriente en función de μ . El tercero, caracteriza muy bien la corriente en función de la posición, o sea, lee $J^+(E, x, y)$ y el cuarto caracteriza muy bien la corriente en función de la energía, leyendo $J^+(\mu, E)$. Este último, incluye una primera clasificación en μ a fin de mantener una correlación entre una variable angular y la energía.

En resumen, el detector está compuesto por cuatro detectores independientes:

1. Determina la E del neutrón, la posición (x e y) y el μ dentro de una clasificación gruesa (de correlación) y el φ dentro de una clasificación fina.
2. Determina la E del neutrón y la posición (x e y) dentro de una clasificación gruesa y el μ dentro de una clasificación fina.
3. Determina la E del neutrón dentro de una clasificación gruesa y la posición (x e y) dentro de una clasificación fina.
4. Determina la dirección μ del neutrón dentro de una clasificación gruesa y la E dentro de una clasificación fina.

Para facilitar la nomenclatura, se llama a la clasificación gruesa macro, y a la fina micro, es decir, la variable discretizada en una clasificación gruesa se encuentra dividida en intervalos que se llaman macro y en el caso de la discretización fina micro. Así, la

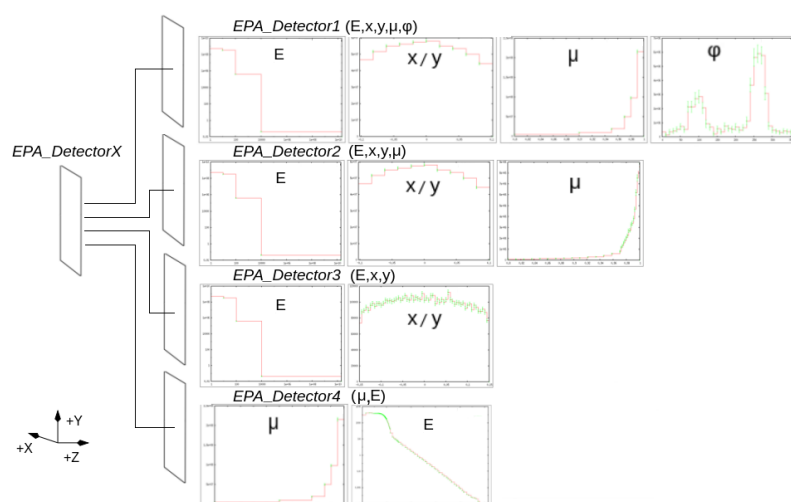


Figura 3.2: Descomposición del detector en cuatro detectores independientes, cada cual tiene la capacidad de determinar en forma detallada la distribución de la corriente en la última variable que puede discernir, mientras que el resto hacen las veces de variables de correlación.

energía se divide en macro y microgrupos, la posición en macro y microzonas (para x e y) y la dirección en macro μ y micro φ (se llama directamente φ). Así, cómo se observa en la Figura 3.2, primero se determina a que macro E , macro x e y , macro μ y φ pertenece el neutrón. Segundo, dentro de ese macro μ , a que micro μ corresponde. Tercero, dentro de esos macro x e y , a que micros corresponden. Y cuarto, dentro de la macro μ y la macro E , que micro E le corresponde. La Figura 3.3 busca plasmar esta última explicación de una forma gráfica.

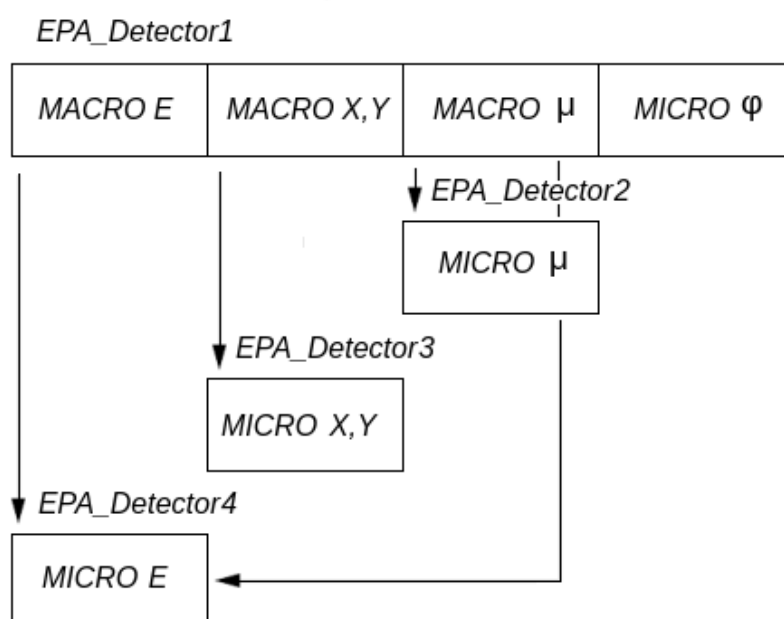


Figura 3.3: Clasificación del neutrón según sus variables.

Finalmente, la utilidad del detector reside en su utilización en conjunto a las fuentes de tracks, a fin de conocer su información estadística. Una vez obtenida la información

de la distribución espectral, espacial y angular, esta hace de *input* a *Source_builderX*.

3.5.2. *Source_builderX*

Este es un componente que reproduce una fuente que genera sus neutrones según una distribución estadística conocida. Esta distribución surge de la información estadística previamente generada por el último detector. Es decir, este componente es una denominada fuente de distribuciones.

La función que cumple es asignar un valor a todas las variables neutrónicas de importancia, es decir, todas las variables que dan identidad al neutrón (véase Sección 1.5). Para el caso de estudio, estas variables se reducen a la posición x , y , z y la velocidad v_x , v_y , v_z . En este caso, al ser plano, la variable z siempre corresponde al valor de z del componente en el instrumento de McStas. Para el caso de las variables x e y , la asignación de un valor surge de la información adquirida a través del *EPA_DetectorX*.

En el caso de las distintas componentes de la velocidad, la asignación no es directa, sino que debe ser calculada por medio de las componentes angulares y la energía del neutrón. Entonces, la velocidad $|\vec{V}|$ resulta proporcional a la raíz cuadrada de la E ,

$$|\vec{V}| = \sqrt{\frac{2}{m_N}} \sqrt{E} \quad (3.4)$$

y $\theta = \arccos \mu$. De esta forma, contando con $|\vec{V}|$, θ y φ , se pueden calcular v_x , v_y y v_z , como $v_x = |\vec{V}| \mu$, $v_y = |\vec{V}| \sin(\theta) \cos(\varphi)$ y $v_z = |\vec{V}| \sin(\theta) \sin(\varphi)$.

Con el fin de explicar cómo se obtuvieron las distribuciones estadísticas de las variables se procede a mostrar el caso particular de la variable x , caso análogo al resto de las variables. En primera medida el detector permite conocer la información estadística para las zonas en x para un dado grupo, es decir, la intensidad para un grupo en función de la zona $I(E_i x_j)$. En la Figura 3.4, se puede observar un gráfico correspondiente a dicha intensidad en función de x .

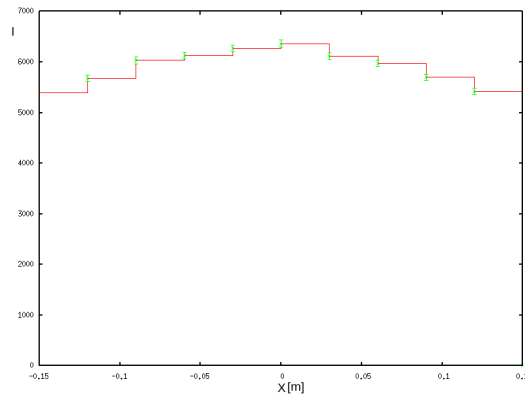


Figura 3.4: Intensidad en función de x para la fuente de tracks.

Para poder hacer uso la información obtenida de la medición y poder generar neutrones que cumplan con esa misma distribución se procede a sumar las intensidades correspondientes a cada zona. Luego, se normaliza esta suma a 1 obteniendo una función de probabilidad para las distintas zonas en x . Finalmente, sorteando un número aleatorio entre 0 y 1 se conoce la probabilidad, y por medio de la función es posible conocer a que intervalo en x corresponderá un dado neutrón. La Figura 3.5 intenta explicar de forma gráfica este proceso.

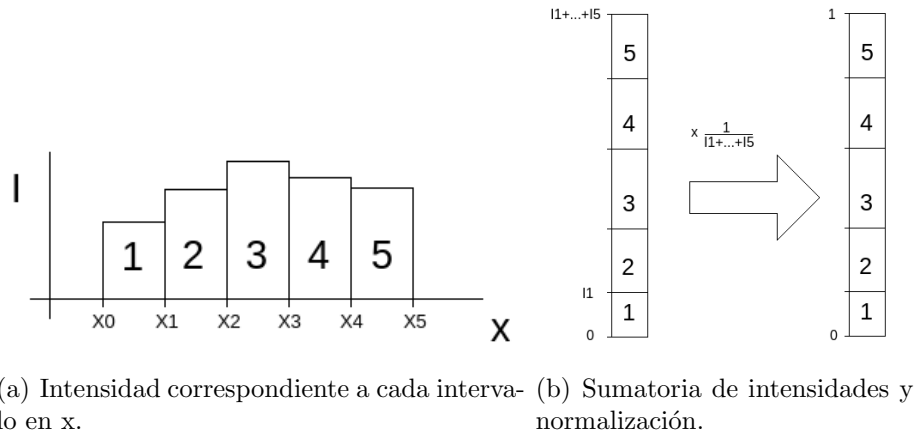


Figura 3.5: Generación de la distribución estadística.

Esta metodología se repite para todas las variables que presentan una distribución estadística, la cual es obtenida a partir de la información generada en dichas variables por el detector. Así, las variables a sortear son E , x , y , μ y φ . Y a partir de estas se asigna un valor a las variables x, y y v_x, v_y, v_z para cada neutrón generado en la fuente.

Capítulo 4

Estudios previos

Previo a la generación de las fuentes de distribuciones y la obtención de los correspondientes resultados, se llevaron a cabo los siguientes análisis.

4.1. Análisis de influencia de la variable φ

Para generar las fuentes de distribuciones se tuvieron en cuenta todas las variables que determinan a la identidad del neutrón, es decir, energía, posición y dirección. Con el objeto de explicar la importancia de tener en cuenta la distribución estadística de φ al momento de generar los neutrones, se comparan a continuación el caso en que se tiene en cuenta dicha distribución (caso 1) y el caso en que se considera que esa variable es sorteada uniformemente (caso 2).

Para realizar el análisis se toma como figura de mérito la relación F entre la corriente integral generada por la fuente de distribuciones (J_D^+) y la corriente integral generada por la fuente de tracks (J_T^+) en distintas posiciones a lo largo del experimento para ambos casos. Es decir,

$$F = J_D^+ / J_T^+. \quad (4.1)$$

Para evaluar la corriente, se utilizan detectores que miden la intensidad de neutrones que los atraviesan. Para los haces GF1 y GT1, la distribución de los detectores para llevar a cabo el análisis es el mostrado en la Figura 4.1. La configuración utilizada para GF3 se muestra en la Figura 4.2 y para GT3 en la Figura 4.3. En todos los casos se utiliza un detector cuya posición z es variable en el espacio entre la salida del conducto de extracción y la entrada del primer tramo del haz, ya sea guía o colimador. El resto ocupa una posición fija, a la cual se le asigna un determinado número. En GF1 y GT1 todos los detectores tienen un área igual a la sección transversal de la guía. En GF3 la posición 3 corresponde a una placa cuadrada de 16.4 cm de lado posicionada a 9 metros de la entrada al conducto de extracción y la posición 4, a una placa cuadrada de 40 cm de lado ubicada a 18 metros de la entrada al conducto de extracción. El detector móvil

(de posición z variable) tiene las mismas dimensiones que el detector en la posición 1. Este último tiene las dimensiones de la entrada del colimador mientras que el detector en la posición 2 tiene las dimensiones de la salida del mismo. En GT3 los detectores tienen un área igual a la sección transversal del colimador.

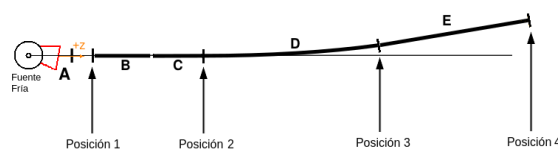


Figura 4.1: Posición de los detectores en los haces GF1 y GT1.

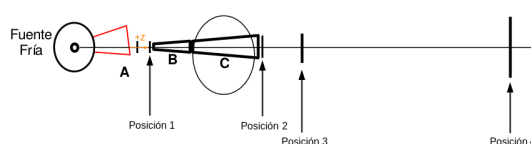


Figura 4.2: Posición de los detectores en el haz GF3.

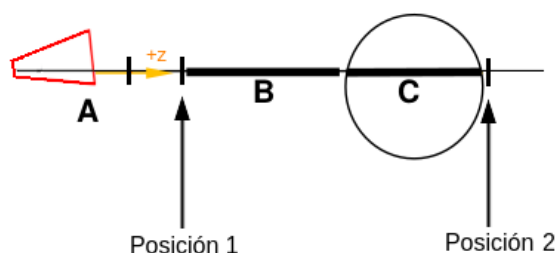
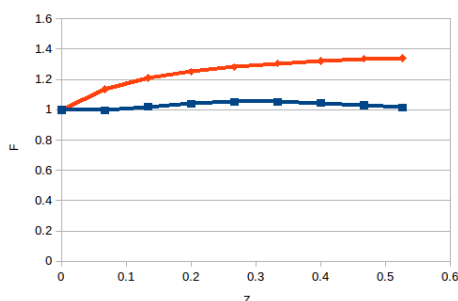
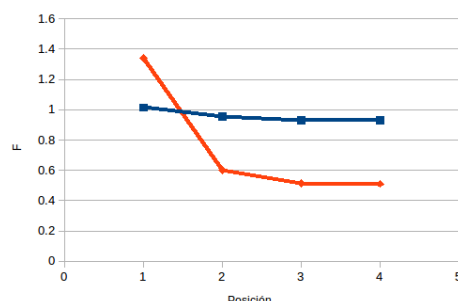


Figura 4.3: Posición de los detectores en el haz GT3.

Se presenta F para los casos 1 y 2 para el haz GF1 en la Figura 4.4, para GF3 en la Figura 4.5, para GT1 en la Figura 4.6 y, por último, para GT3 en la Figura 4.7.



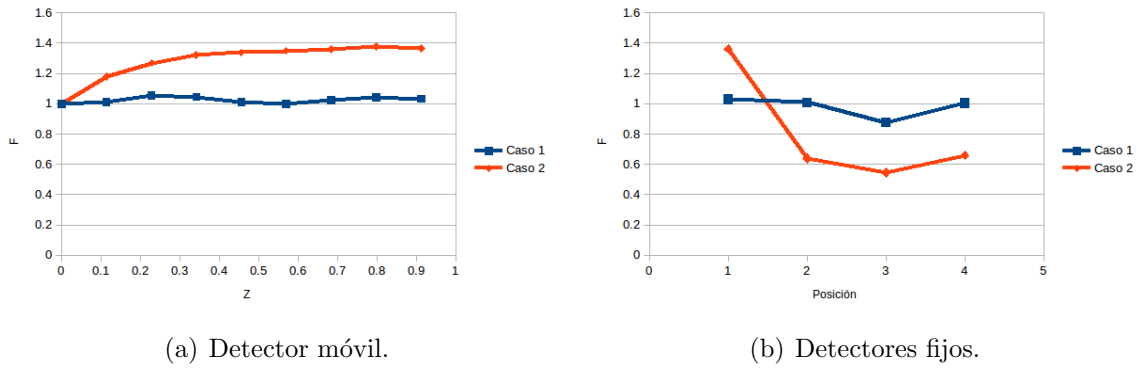
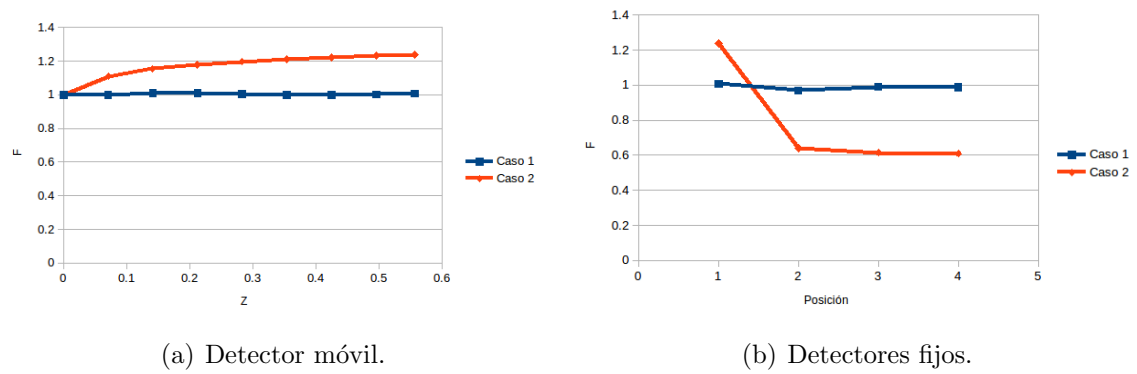
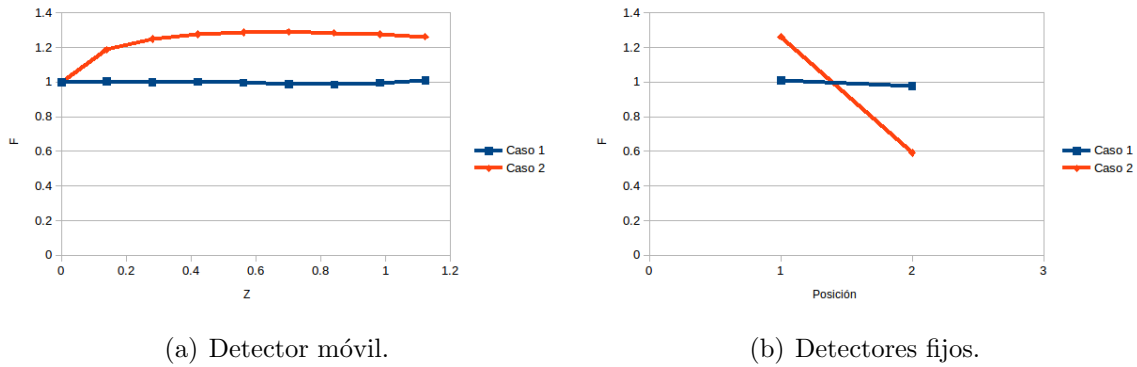
(a) Detector móvil.



(b) Detectores fijos.

Figura 4.4: F para los distintos casos de estudio para GF1.

A partir de los haces analizados, puede verse que F presenta una importante desviación respecto a la unidad para el caso 2. Esto es debido a que para generar en forma

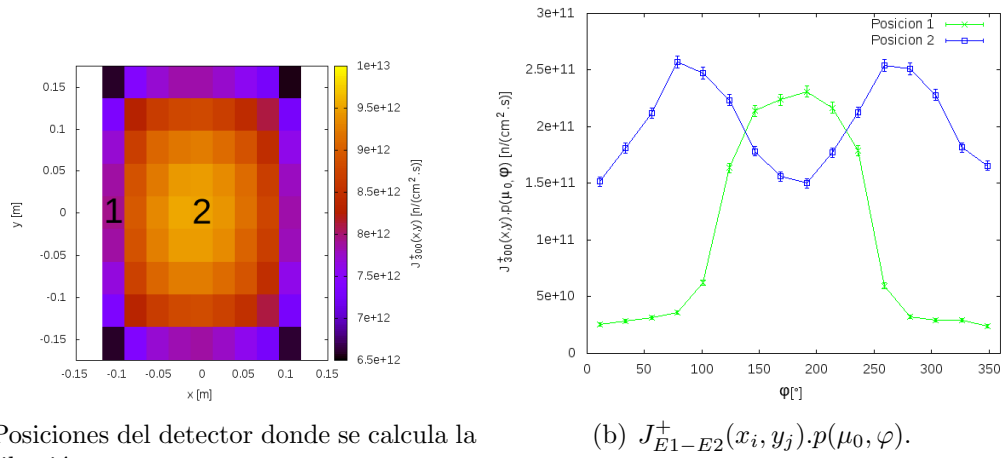
**Figura 4.5:** F para los distintos casos de estudio para GF3.**Figura 4.6:** F para los distintos casos de estudio para GT1.**Figura 4.7:** F para los distintos casos de estudio para GT3.

acorde las fuentes, hay que poder reproducir de la forma más exacta la fuente de tracks. Así, lograr que casi todos los neutrones que llegan a la entrada de un colimador o guía generados con la fuente de tracks, también lo hagan para la fuente de distribuciones. Entonces, asignar un valor erróneo a la variable φ tiene como consecuencia que los neutrones son generados con una dirección distinta a la que deberían tener y ya no alcanzan la entrada del conducto o el caso contrario, que neutrones que antes no lo hacían, ahora lo hacen.

En nuestro caso de estudio, las fuentes a reproducir ocupan posiciones lejanas a

las entradas a los conductos (guías/colimadores) debido a que se busca generar fuentes absolutas, entonces resulta vital considerar la distribución estadística de la variable azimutal φ a la hora de generar dichas fuentes.

Mediante la Figura 4.8, se puede apreciar que el haz GT1 posee una distribución en φ , para distintas posiciones sobre un detector ubicado cercano a la fuente, muy distinta a una distribución uniforme. En esta imagen, también es posible advertir, que la distribución en φ depende de las variables espaciales.



(a) Posiciones del detector donde se calcula la distribución en φ .

(b) $J_{E1-E2}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu_0, \varphi)$.

Figura 4.8: Distribución en la variable φ para distintas posiciones sobre el detector.

4.2. Caracterización de los haces para la obtención de las fuentes de distribuciones

Con el fin de producir en forma acorde las fuentes de distribuciones, primero fue necesario caracterizar adecuadamente las fuentes de tracks. Se calculan para todos los haces las magnitudes más relevantes en las posiciones a la salida de los conductos de extracción, posiciones mostradas en la Figura 4.9. En la Tabla 4.1, se presentan dichas magnitudes y su correspondiente interpretación física. Además a fin de obtener valores integrales en los puntos de generación de las fuentes de distribuciones, se calcularon el resto de las magnitudes presentadas en la misma tabla. Para una mejor comprensión acerca de las magnitudes calculadas véase el Apéndice A.

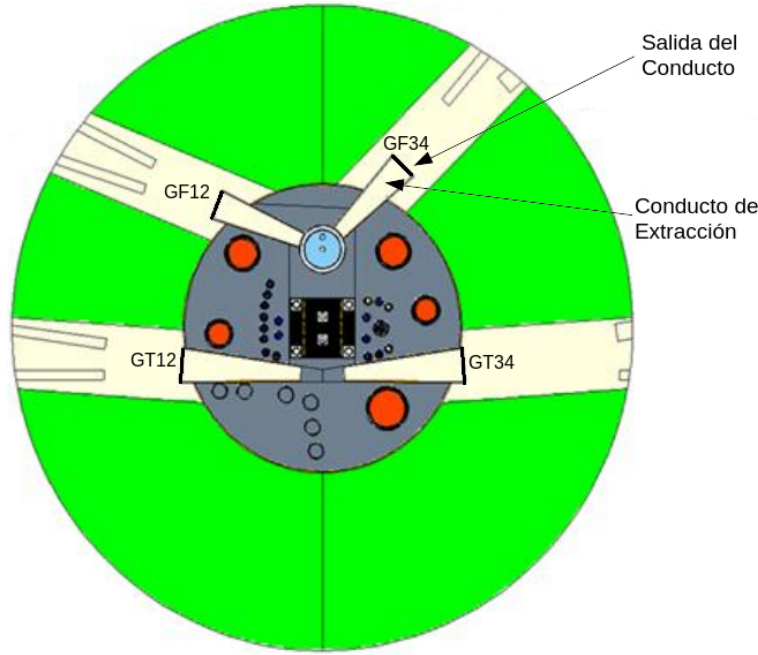


Figura 4.9: Posición de grabado de fuentes en el modelo de MCNP.

4.2.1. GF1 y GF2

El siguiente análisis se realizó a la salida del conducto de extracción para la fuente de tracks común a GF1 y GF2, es decir, sobre la superficie GF12 de la Figura 4.9. La Tabla 4.2 presenta las magnitudes calculadas sobre dicha superficie.

A continuación, se grafican las magnitudes mencionadas en la Tabla 4.1. En la Figura 4.10 se grafican $J_{10}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu)$ y $J_{10}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu_0, \varphi)$ para las dos posiciones del detector indicadas en la Figura 4.10(a). Para la posición central “2” puede observarse que la dirección más probable corresponde a $\theta = 0^\circ$, mientras que para la posición lateral “1” la distribución en μ se centra en un valor aproximado a $\theta = 9^\circ$. Esto se explica en la Figura 4.11(a) donde se muestra qué visión de la fuente posee cada uno de estos puntos. Debido a que se están observando los neutrones fríos, que provienen casi exclusivamente de la entrada del conducto de extracción, se espera que en la posición lateral los neutrones posean una dirección promedio aproximadamente igual al vector Ω_1 , que posee un valor asociado de θ distinto de 0. Si los neutrones fríos proviniesen sólo del punto central “P” en la entrada al conducto de extracción, la distribución de μ en la posición lateral sería una delta centrada en el valor de θ mencionado anteriormente y la distribución en φ una delta centrada en $\varphi = 180^\circ$. Debido a que no se trata de una fuente puntual si no de una fuente rectangular, las distribuciones en μ y en φ se “abren” respecto del caso anterior. En cuanto a la distribución en φ correspondiente a la posición centrada, se espera observar una simetría tal que $p(\varphi = 90^\circ) = p(\varphi = 270^\circ)$ y $p(\varphi = 0^\circ) = p(\varphi = 180^\circ)$. Finalmente, se observa que para las direcciones con

Tabla 4.1: Magnitudes graficadas y calculadas en las salidas de los conductos de extracción.

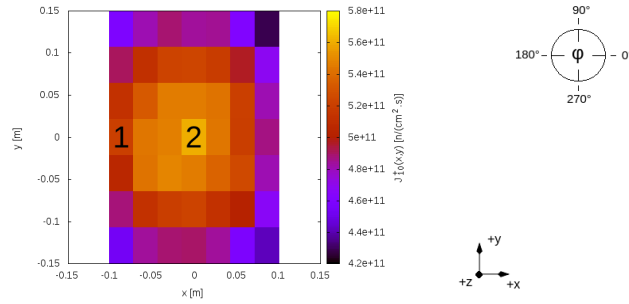
Magnitud distribucional graficada	Interpretación física
$J^+(E)[\frac{n}{cm^2.s.meV}]$	Distribución espectral de la corriente promediada espacialmente sobre la sección de salida del conducto de extracción.
$J_{E1-E2}^+(x, y)[\frac{n}{cm^2.s}]$	Distribución espacial de la corriente integrada en el intervalo de energías correspondiente a un dado macrogrupo, promediada en el área de la microzona correspondiente a la posición $(x; y)$. En el caso en que no se especifica una energía corresponde a un intervalo entre 0 y la energía especificada.
$J_{E1-E2}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu)[\frac{n}{cm^2.s.r}]$	Distribución en μ de la corriente integrada en el intervalo de energías correspondiente a un dado macrogrupo para la posición $(x; y)$ correspondiente a la macrozona ij promediada espacialmente en dicha zona.
$J_{E1-E2}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu_0, \varphi)[\frac{n}{cm^2.s}]$	Distribución azimutal de la corriente integrada en el intervalo de energías correspondiente a un dado macrogrupo para la posición $(x; y)$ correspondiente a la macrozona ij promediada espacialmente en dicha zona para el macro μ que va entre 0° y 10° .
Magnitud integral calculada	Interpretación física
$J^+[\frac{n}{cm^2.s}]$	Corriente saliente promediada sobre la sección de salida del conducto de extracción.
$J_{E1-E2}^+[\frac{n}{cm^2.s}]$	Corriente saliente integrada en el intervalo de energías $[E1; E2]$ promediada sobre la sección de salida del conducto de extracción.
$\langle E \rangle [meV]$	Energía promedio de la distribución espectral.
$\langle E \rangle_{E1-E2} [meV]$	Energía promedio de la distribución espectral para el intervalo de energías $[E1; E2]$.
$E_{mp}[meV]$	Energía más probable en la distribución espectral.

$\varphi = 90^\circ$ y $\varphi = 270^\circ$, la intensidad es un 250 % más alta que para las direcciones $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 180^\circ$. Este efecto se debe a que la superficie de entrada al conducto es más alta que ancha, por lo que la posición central a la salida posee mayor longitud visible de fuente en sentido vertical que en el horizontal.

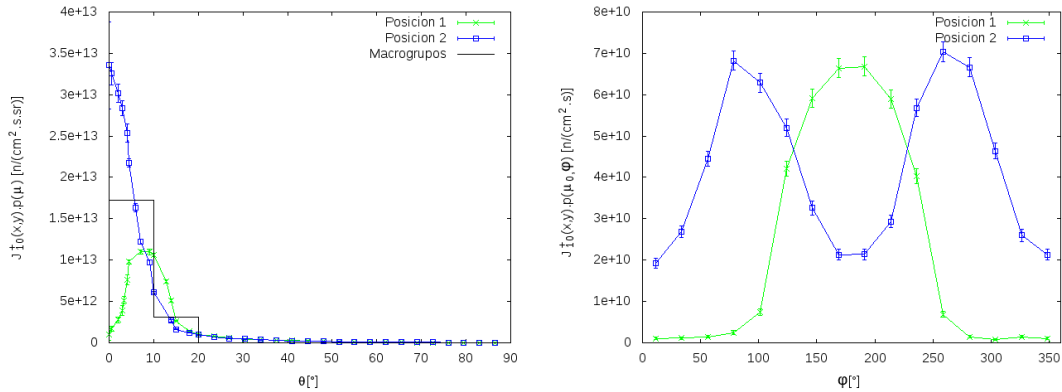
Luego, se grafica en la Figura 4.12 $J_{E1-E2}^+(x, y)$ para todos los macrogrupos. Notar que dada la distinta cantidad de partículas presentes en cada macrogrupo y consecuentemente distinta estadística se recurre a una discretización en zonas variable según el grupo. A partir de la Figura 4.12(a) se puede notar que la corriente es superior en el centro del detector respecto a los bordes. Este efecto se reitera para el intervalo de 10

Tabla 4.2: Magnitudes calculadas para la fuente de tracks en la posición de salida del conducto de extracción común a GF1 y GF2.

Magnitud	Valor calculado
J^+	3.79×10^{12}
J_{10}^+	5.05×10^{11}
J_{10-300}^+	3.15×10^{12}
$J_{300-5 \times 10^8}^+$	1.29×10^{11}
$J_{5 \times 10^8-2 \times 10^{10}}^+$	6.20×10^{11}
$\langle E \rangle$	4.17×10^6
$\langle E \rangle_{10}$	5.43
$\langle E \rangle_{10-300}$	53.03
E_{mp}	3.75
Sección de GF12	
Ancho [cm]	Alto [cm]
20.23	30



(a) $J_{10}^+(x,y)$ discretizada en macrozo-
nas. (b) Sistema de
referencia de la
variable φ .



(c) $J_{10}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu)$ para distintas posiciones. (d) $J_{10}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu_0, \varphi)$ para distintas posiciones.

Figura 4.10: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del conducto de extracción en GF1 y GF2.

a 300 meV, con un sutil corrimiento hacia la izquierda (dirección $-x$). Debido a que dicho lateral tiene visión de una zona con un flujo más energético.

Finalmente, se grafica en la Figura 4.13 $J^+(E)$. En la Figura 4.13(a) se grafica el

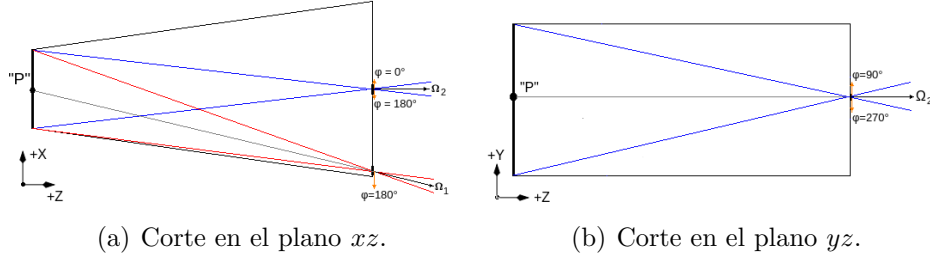


Figura 4.11: Trazado de rayos en el conducto de extracción para las posiciones 1 y 2.

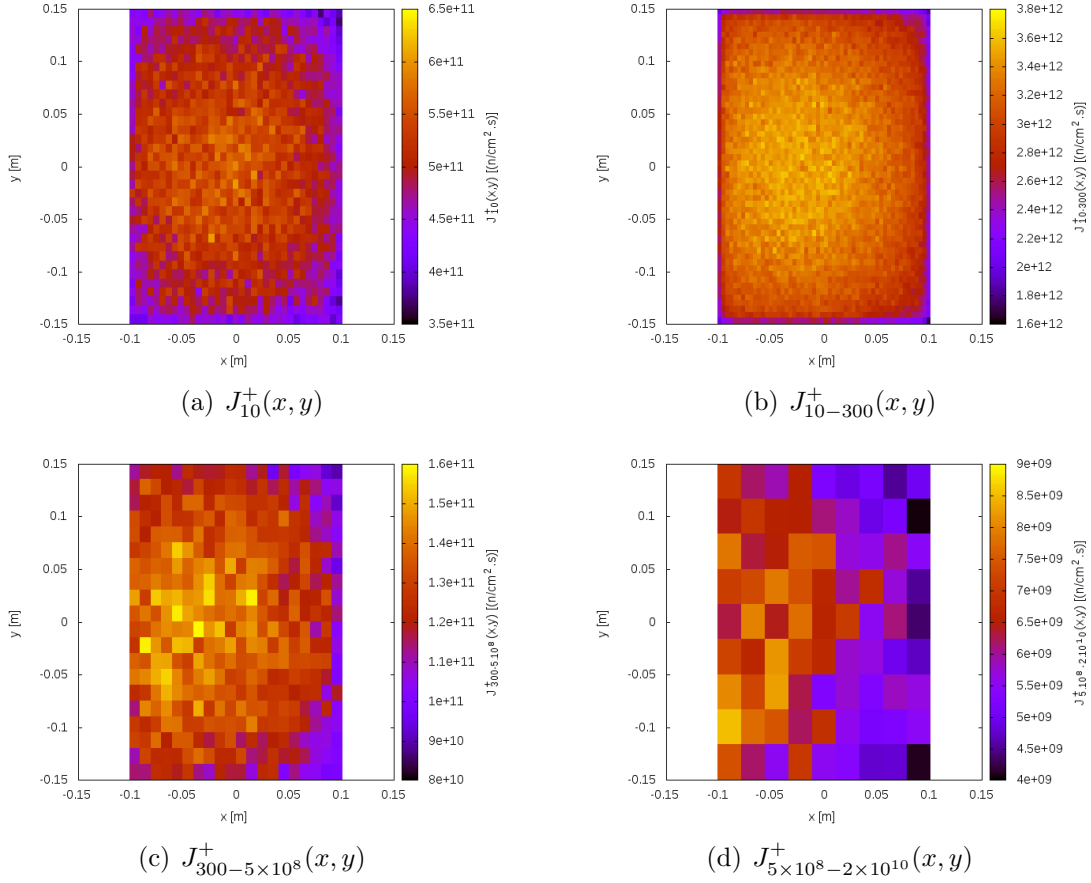


Figura 4.12: $J_{E1-E2}^+(x, y)$ discretizada en microzonas a la salida del conducto de extracción en GF1 y GF2.

espectro en escala *log-log*, donde son discernibles los distintos macrogrupos. Notar que dichos grupos corresponden a energías características. Así, el primero corresponde al intervalo $[0;10)$ meV, relacionado a los neutrones que provienen casi exclusivamente de la fuente fría, el segundo al intervalo $[10;300)$ meV, relacionado a los neutrones térmicos provenientes principalmente del reflector de agua pesada, el tercero al intervalo $[300 \text{ meV}; 500 \text{ KeV})$, correspondiente a los neutrones epitérmicos y el cuarto al intervalo $[500 \text{ KeV}; 20 \text{ MeV})$, correspondiente a neutrones rápidos. En la Figura 4.13(b) se grafica el espectro en escala *lin-log* para los distintos macro μ . En esta última podemos apreciar que mientras más colimados son los neutrones, más fríos son. Para el espectro con θ

entre 0° y 10° , la energía más probable resulta aproximadamente de 1.65 meV. En cambio, para el espectro con θ entre 20° y 90° la energía más probable es 25 meV. Este hecho permite confirmar que los neutrones menos colimados provienen, efectivamente, del reflector de agua pesada y no de la fuente fría.

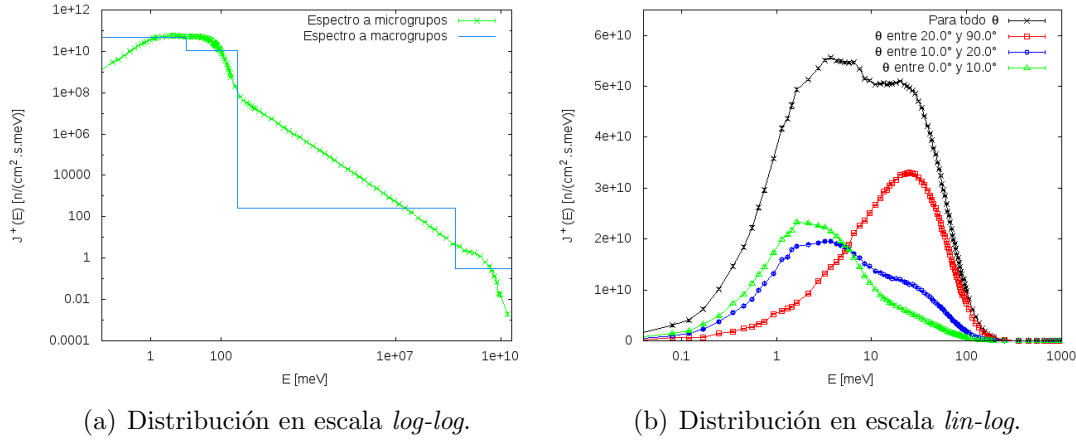


Figura 4.13: Distribución espectral a la salida del conducto de extracción en GF1 y GF2.

4.2.2. GF3 y GF4

El siguiente análisis se realizó a la salida del conducto de extracción para la fuente de tracks común a GF3 y GF4, es decir, sobre la superficie GF34 de la Figura 4.9. La Tabla 4.3 presenta las magnitudes calculadas sobre dicha superficie.

Tabla 4.3: Magnitudes calculadas para la fuente de tracks en la posición de salida del conducto de extracción común a GF3 y GF4.

Magnitud	Valor calculado
J^+	3.51×10^{12}
J_{10}^+	4.94×10^{11}
J_{10-300}^+	2.91×10^{12}
$J_{300-5 \times 10^8}^+$	1.01×10^{11}
$J_{5 \times 10^8-2 \times 10^{10}}^+$	6.87×10^{11}
$\langle E \rangle$	5.75×10^6
$\langle E \rangle_{10}$	5.36
$\langle E \rangle_{10-300}$	52.75
E_{mp}	3.75
Sección de GF34	
Ancho [cm]	Alto [cm]
20.23	30

A continuación, se grafican las magnitudes mencionadas en la Tabla 4.1. En la Figura 4.14 se grafican $J_{10}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu)$ y $J_{10}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu_0, \varphi)$ para las dos posiciones

del detector indicadas en la Figura 4.14(a). Puede observarse para la posición lateral inferior “1” que la distribución en μ está centrada en $\theta = 9^\circ$. Este caso es análogo a GF1 y GF2, por tratarse de una posición ubicada en un lateral. También puede verse en la Figura 4.14(c), que ambas curvas se cruzan. Esto se explica en la Figura 4.15. Dado que la posición “1” corresponde a una posición sobre el extremo inferior izquierdo del detector, inciden sobre la misma neutrones con θ mayores que para la posición “2”. Con respecto a la distribución en φ correspondiente a la posición “1” ocurre algo similar que para la posición “1” estudiada para GF1 y GF2, pero por encontrarse ubicada en la posición inferior izquierda, su distribución se centra entre $\varphi = 180^\circ$ y $\varphi = 270^\circ$.

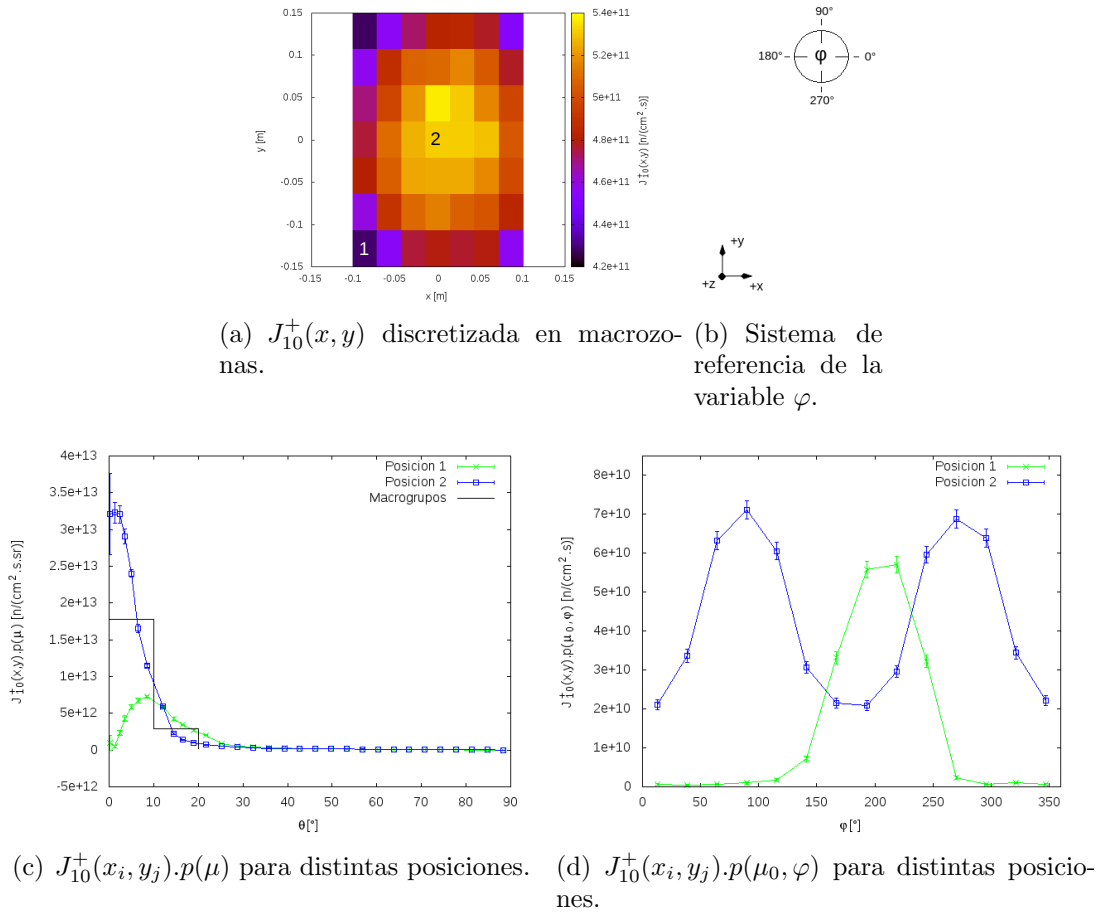


Figura 4.14: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del conducto de extracción en GF3 y GF4.

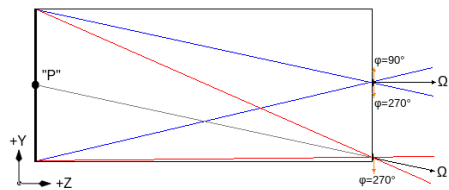


Figura 4.15: Corte en el plano yz de trazado de rayos en el conducto de extracción para las posiciones 1 y 2.

Luego, se grafica en la Figura 4.16 $J_{E1-E2}^+(x, y)$ para todos los macrogrupos. A partir de la Figura 4.16(a) se puede visualizar que la corriente es un 22 % superior en el centro del detector respecto a los bordes. Este fenómeno se reitera para el intervalo de 10 a 300 meV, con un sutil corrimiento hacia la derecha. Este mismo efecto se ve potenciado a medida que la energía aumenta. Esta observación es semejante a la realizada para GF1 y GF2, salvo que el máximo está desplazado hacia el otro lado debido a que GF3 y GF4 se encuentran enfrentados a GF1 y GF2. Finalmente, se grafica en la Figura 4.17 $J^+(E)$ en escala *log-log* y en escala *lin-log*.

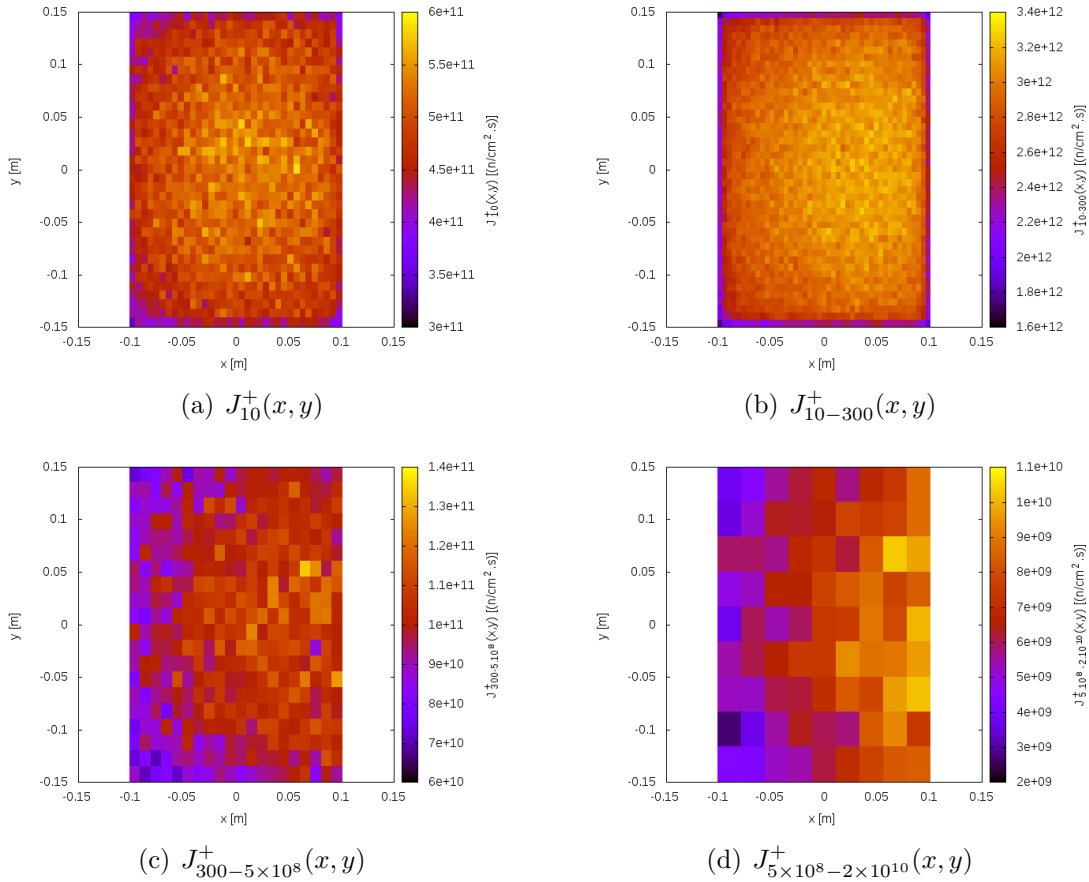


Figura 4.16: $J_{E1-E2}^+(x, y)$ discretizada en microzonas a la salida del conducto de extracción en GF3 y GF4.

4.2.3. GT1 y GT2

El siguiente análisis se realizó a la salida del conducto de extracción para la fuente de tracks común a GT1 y GT2, es decir, sobre la superficie GT12 de la Figura 4.9. La Tabla 4.4 presenta las magnitudes calculadas sobre dicha superficie.

A continuación, se grafican las magnitudes mencionadas en la Tabla 4.1. En la Figura 4.18 se grafican $J_{300}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu)$ y $J_{300}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu_0, \varphi)$ para las dos posiciones del detector indicadas en la Figura 4.18(a). Con respecto a la distribución en μ , el

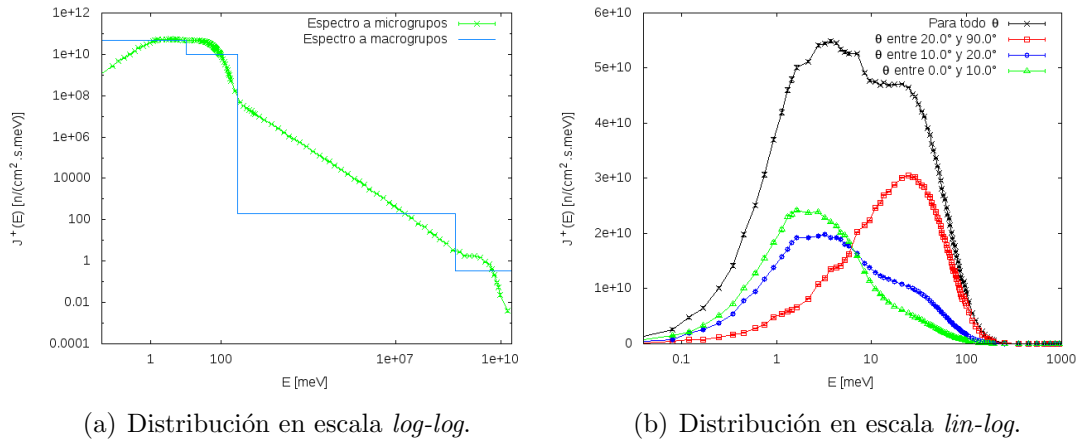


Figura 4.17: Distribución espectral a la salida del conducto de extracción en GF3 y GF4.

Tabla 4.4: Magnitudes calculadas para la fuente de tracks en la posición de salida del conducto de extracción común a GT1 y GT2.

Magnitud	Valor calculado
J^+	9.91×10^{12}
J_{300}^+	8.38×10^{12}
$J_{300-5 \times 10^8}^+$	1.41×10^{12}
$J_{5 \times 10^8-2 \times 10^{10}}^+$	1.23×10^{11}
$\langle E \rangle$	2.79×10^7
$\langle E \rangle_{300}$	57.92
E_{mp}	27.5
Sección de GT12	
Ancho [cm]	Alto [cm]
23.69	35

gráfico es muy similar al caso de GF1 y GF2, por lo que su explicación es análoga. En cuanto a la distribución en φ ocurre lo mismo, salvo que por encontrarse la posición “1” en el lateral derecho, la distribución está centrada en $\varphi = 0^\circ$. Se nota como salvedad que la diferencia relativa entre la corriente en $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$ es menor para este caso. Esto se debe a que existe una corriente base proveniente de los laterales del conducto de extracción que tiende a uniformizar dicha distribución.

Luego, se grafica en la Figura 4.19 $J_{E1-E2}^+(x, y)$ para todos los macrogrupos. A partir de la Figura 4.19(a) se puede advertir que la corriente es un 35 % superior en el centro del detector respecto a los bordes. A medida que la energía aumenta, se observa un corrimiento en la intensidad hacia la derecha, por la misma razón que en los casos anteriores.

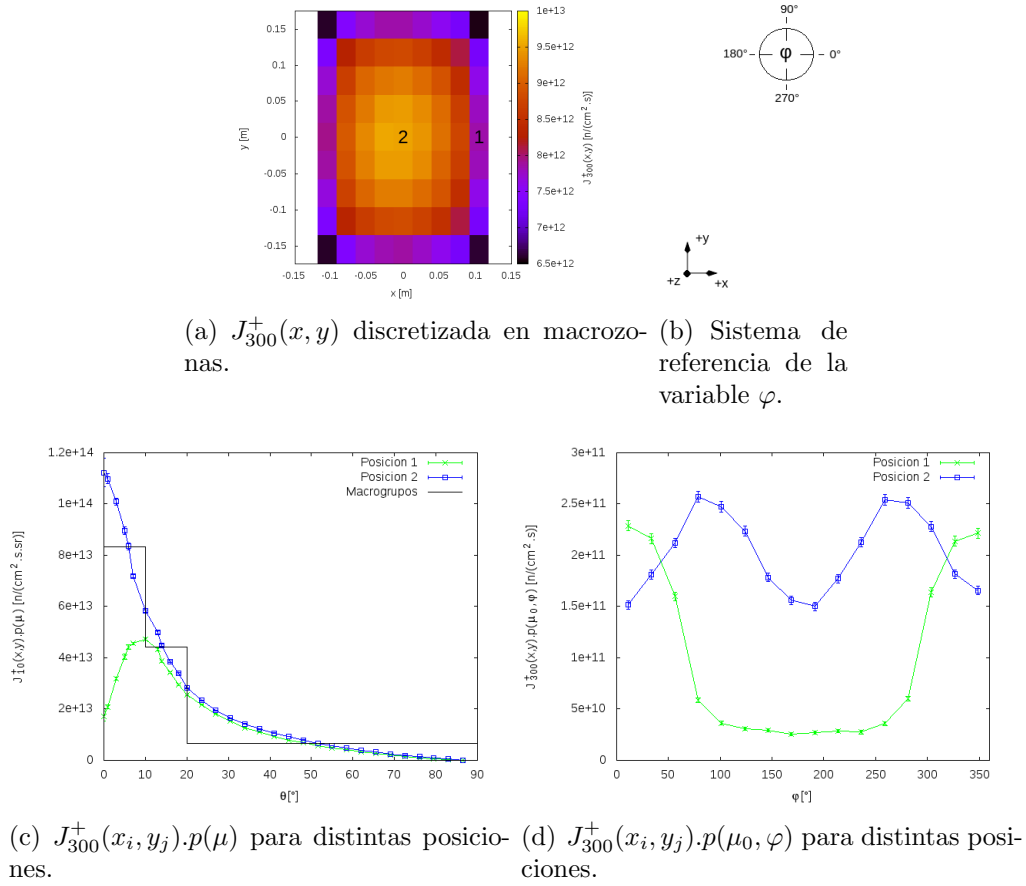


Figura 4.18: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del conducto de extracción en GT1 y GT2.

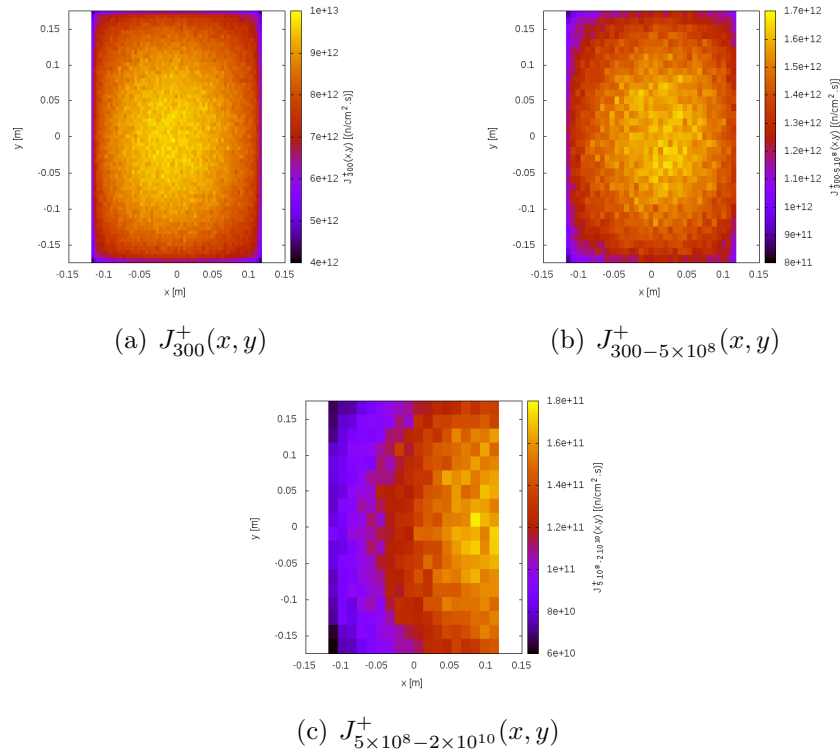


Figura 4.19: $J_{E1-E2}^+(x, y)$ discretizada en microzonas a la salida del conducto de extracción en GT1 y GT2.

Finalmente, se grafica en la Figura 4.20 $J^+(E)$. En la Figura 4.20(a) son discernibles los distintos macrogrupos de energía. El primero de ellos corresponde al intervalo $[0;300)$ meV, que engloba a los neutrones térmicos. El resto es igual que para los haces fríos. En la Figura 4.20(b) se puede apreciar que la energía más probable no depende de θ , dado que los neutrones provenientes de la entrada del conducto (los más colimados) tanto como del moderador (los menos colimados) poseen las mismas energías.

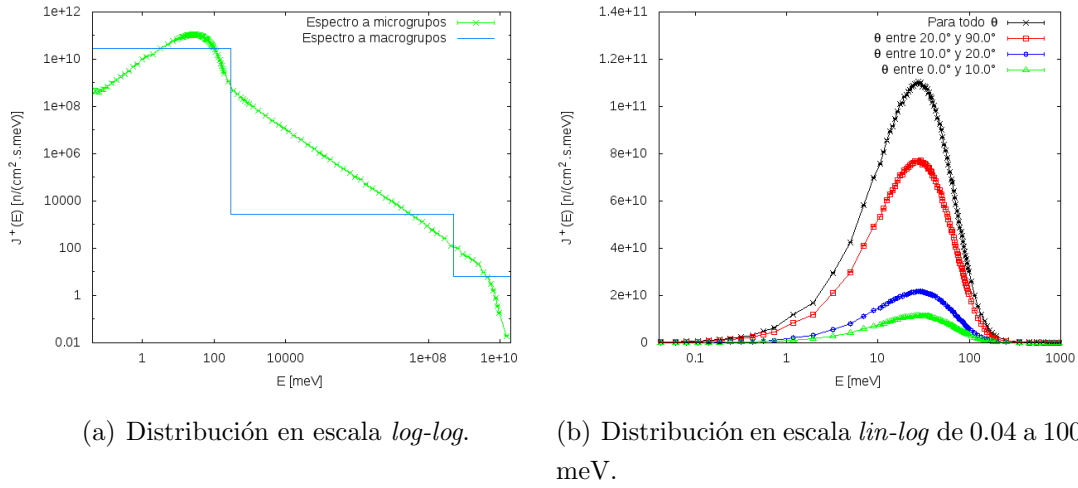


Figura 4.20: Distribución espectral a la salida del conducto de extracción en GT1 y GT2.

4.2.4. GT3 y GT4

El siguiente análisis se realizó a la salida del conducto de extracción para la fuente de tracks común a GT3 y GT4, es decir, sobre la superficie GT34 de la Figura 4.9. La Tabla 4.5 presenta las magnitudes calculadas sobre dicha superficie. También, se presentan las magnitudes mencionadas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.5: Magnitudes calculadas para la fuente de tracks en la posición de salida del conducto de extracción común a GT3 y GT4.

Magnitud	Valor calculado
J^+	8.91×10^{12}
J_{300}^+	7.34×10^{12}
$J_{300-5 \times 10^8}^+$	1.45×10^{12}
$J_{5 \times 10^8-2 \times 10^{10}}^+$	1.32×10^{11}
$\langle E \rangle$	3.32×10^7
$\langle E \rangle_{300}$	58.45
E_{mp}	27.5
Sección de GT34	
Ancho [cm]	Alto [cm]
23.69	35

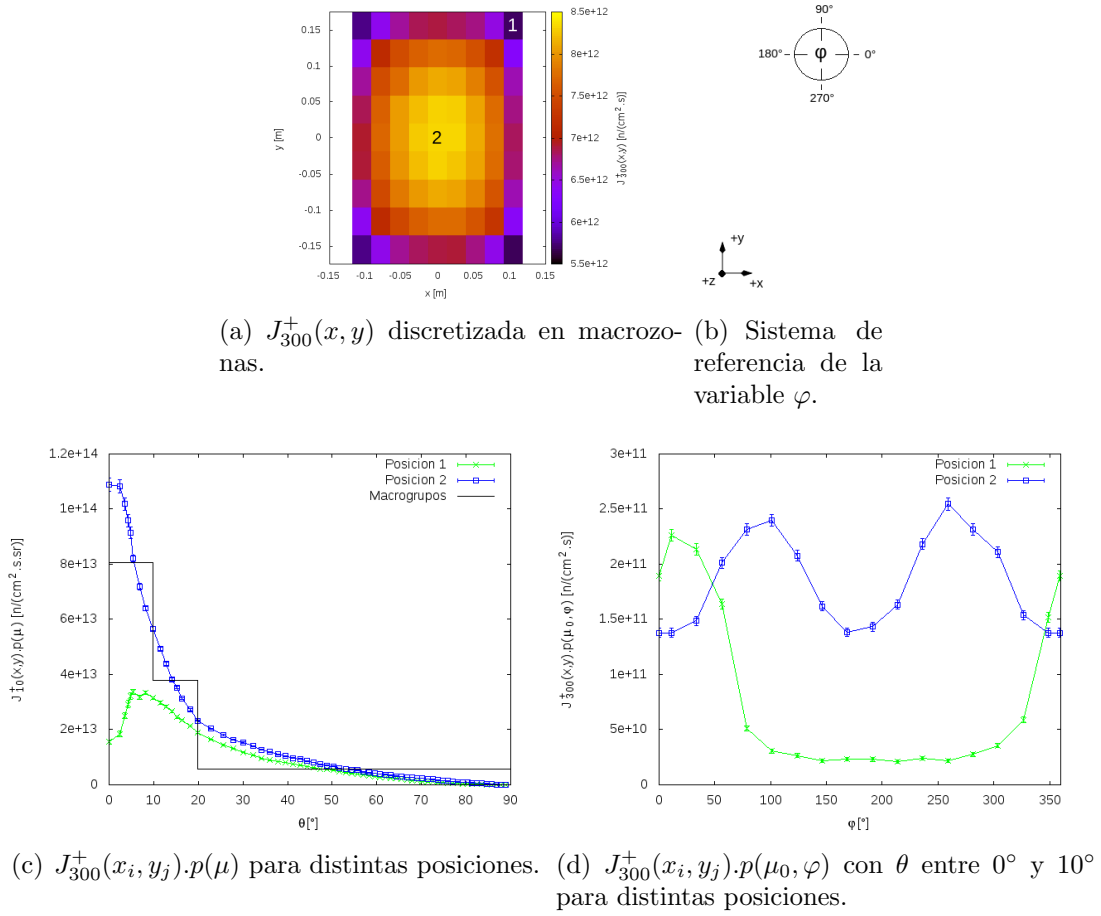


Figura 4.21: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del conducto de extracción en GT3 y GT4.

En la Figura 4.21 se grafican $J_{300}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu)$ y $J_{300}^+(x_i, y_j) \cdot p(\mu_0, \varphi)$ para las dos posiciones del detector indicadas en la Figura 4.21(a). Se observan distribuciones en μ análogas a las presentadas en el caso GF1 y GF2. La distribución en φ para la posición “1” se encuentra centrada en 15° , es decir, entre los valores de 0° y 90° .

Luego, se grafica en la Figura 4.22 $J_{E1-E2}^+(x, y)$ para todos los macrogrupos. A partir de la Figura 4.22(a) se puede apreciar que la corriente es un 30 % superior en el centro del detector con respecto a los bordes. A medida que la energía aumenta, se observa un corrimiento en la intensidad hacia la izquierda.

Finalmente, se grafica en la Figura 4.23 $J^+(E)$ en escala *log-log* y en escala *lin-log*. Se nota a partir de la Figura 4.23(c) que los neutrones presentan el mismo espectro para todos los ángulos. Esto es consecuencia de que los neutrones incidentes tanto de la entrada como de los laterales del conducto de extracción provienen del agua pesada a la misma temperatura.

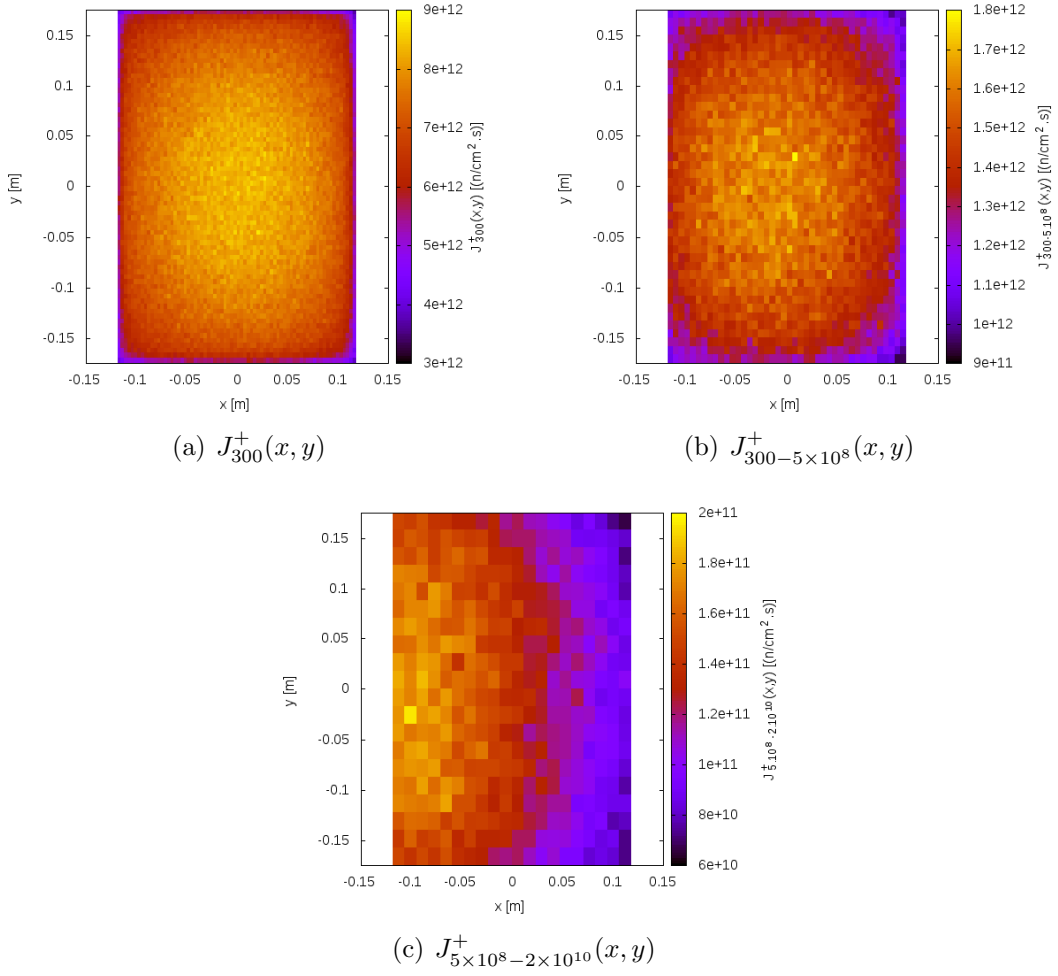


Figura 4.22: $J_{E1-E2}^+(x, y)$ discretizada en microzonas a la salida del conducto de extracción en GT3 y GT4.

4.3. Generación de las fuentes de distribuciones

Las representaciones mostradas en la sección anterior, sirvieron para poder hallar una discretización que permitiese generar las fuentes de distribuciones en forma acorde. Para ello, se tuvo en cuenta que se cumplieran dos condiciones, la primera, que las discretizaciones usadas permitiesen una representación suave de la distribución en cada una de las variables y la segunda, que la magnitud F (ec. 4.1) calculada en los puntos de utilización del haz tuviese un valor superior a 0.9.

En la Tabla 4.6, se presenta el valor de F obtenido con las fuentes generadas para cada haz. A su vez, se muestra en la misma tabla la cantidad de discretizaciones en todas las variables utilizadas para la generación de las fuentes, donde n_i corresponde a la cantidad en que se discretiza en forma fina la variable i y N_i a la cantidad de clasificaciones gruesas empleadas. Para el caso de las variables espaciales (x e y), la cantidad de zonas en que se divide el detector depende de la energía, por lo que se especifica la correspondiente discretización para cada macrogrupo. El orden en el cual se

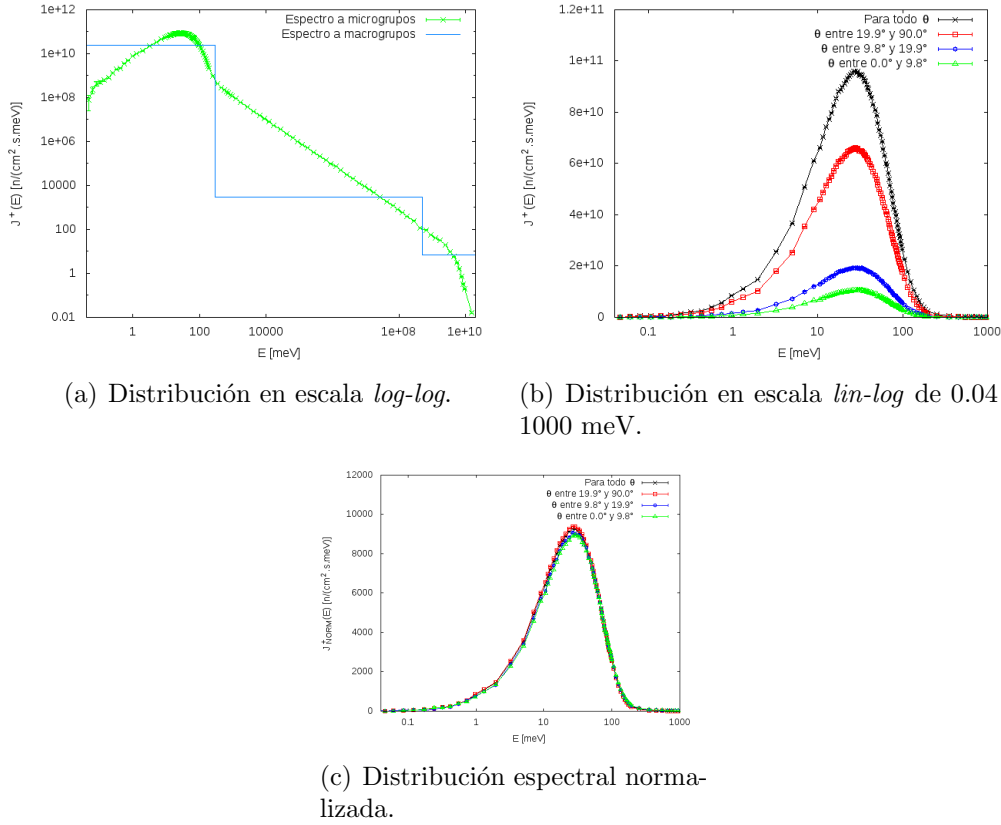


Figura 4.23: Distribución espectral a la salida del conducto de extracción en GT3 y GT4.

disponen, es en orden creciente de energía. Así, notar que para GF1 hay 6 macrogrupos y se especifica una discretización en 72 zonas para el grupo menos energético y una de 30 para el grupo más energético. La razón de esta discretización variable es que la estadística también varía en función del macrogrupo. Utilizando este esquema de discretizaciones se obtiene un valor de F que cumple con el objetivo $F > 0.9$ para todos los haces.

Tabla 4.6: Discretizaciones utilizadas en todas las variables y figura de mérito F .

Haz	n_E	N_E	$n_x=n_y$	$N_x=N_y$	n_μ	N_μ	n_φ	F
GF1	150	6	72 72 72 72 42 30	9 9 9 9 7 5	50	4	20	0.9178
GF2	150	6	72 72 72 72 42 30	9 9 9 9 7 5	50	4	20	0.9317
GF3	150	4	35 45 20 9	7 9 5 3	50	3	20	0.9640
GF4	150	4	35 45 20 9	7 9 5 3	50	3	20	0.9252
GT1	143	3	63 35 18	9 5 3	65	3	16	0.9737
GT2	143	3	63 35 18	9 5 3	65	3	16	0.9505
GT3	143	3	72 42 20	9 7 5	65	3	16	0.9495

La discretización en la variable energía depende de la misma, es decir, no se utiliza el mismo paso para energías “térmicas” que para “rápidas”. Las variables espaciales sí están discretizadas en pasos constantes. La discretización en μ es en pasos variables. Y por último, φ se encuentra discretizada en pasos constantes. Para explicar esto con

más detalle, se presenta en la Figura 4.24 un ejemplo de utilización del componente *EPA_DetectorX*. Este detector tiene 5 “listas” como archivos de entrada. El archivo “Egroups2.txt” especifica los cortes en energía de los macrogrupos, “Egroups3.txt” los cortes en energía de los microgrupos, “Ugroups16.txt” los cortes en μ de los macro μ , “Ugroups40.txt” los cortes en μ de los micro μ y, por último, “XY3.txt” la cantidad de macro y microzonas (para cada macrogrupo) en que se discretizarán las variables x e y . Entonces, los primeros 4 archivos determinan los cortes en las variables E y μ . Luego, conociendo las dimensiones del detector y la cantidad de zonas en que se divide se calculan los cortes en x e y . La cantidad de intervalos en φ se especifica en el *input*, y se calculan los cortes en dicha variable de la misma forma que con las variables espaciales. En la Tabla 4.7, se especifican todos los parámetros de entrada del detector.

Los archivos de salida que genera el detector son 4, cada uno correspondiente a cada “detector independiente” dentro del componente. Dichos archivos tienen el nombre “EPAX0*i*.txt”, donde el índice i es reemplazado por el número del detector que lo genera. Cada uno de ellos especifica la intensidad medida por el detector en función de las variables en que es capaz de clasificar los neutrones. Por lo tanto, el archivo “EPAX01.txt” corresponderá a $I(E, x, y, \mu, \varphi)$, “EPAX02.txt” a $I(E, x, y, \mu)$, “EPAX03.txt” a $I(E, x, y)$ y “EPAX04.txt” a $I(E)$. Nótese que la información recopilada por el detector no se encuentra normalizada a la intensidad de operación (véase Sección 3.5). Estos 4 archivos hacen de entrada a *Source_builderX*, junto con la lista “XY3.txt” con la cantidad de macro y microzonas. A través del parámetro “filename_XY” se le indica a la fuente que archivo debe tomar como entrada para especificar el número de zonas. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 4.24 un instrumento que utiliza el componente *EPA_DetectorX*.

```

DEFINE INSTRUMENT GT1()
DECLARE
%{
  double gap = 0.0001;
  double rotation_angle = -176;
  double width = 0.2369410;
  double height = 0.35;
}%
TRACE
COMPONENT Fuente_de_tracks = Ptrac_source_difra(file="GT12p",stheta=rotation_angle*PI/180.0,
xc=-1.024498,yc=-0.2583601,zc=-0.05,intensity=1,nps=1,verbose=1,
autocenter="translate,rotate",smooth=0,MCNP_ANALYSE=10000)
AT (0,0,0) ABSOLUTE
COMPONENT det3 = EPA_DetectorX(pg2=20,xwidth=width,yheight=height,file_XY="XY3.txt",file_E1="Egroups2.txt",
file_E2="Egroups3.txt",file_U1="Ugroups16.txt",file_U2="Ugroups40.txt")
AT (0,0,gap) RELATIVE Fuente_de_tracks
COMPONENT ...
END

```

Figura 4.24: Ejemplo de instrumento para leer fuentes de tracks.

Tabla 4.7: Parámetros de entrada de *EPA_DetectorX*.

<i>EPA_DetectorX</i>		
Parámetro	Tipo	Descripción
pg2	<i>integer</i>	Cantidad de discretizaciones en φ .
xwidth	<i>double</i>	Ancho del detector (en metros).
yheight	<i>double</i>	Altura del detector (en metros).
file_XY	<i>string</i>	A este parámetro se le indica qué archivo debe tomar como entrada.
file_E1		
file_E2		
file_U1		
file_U2		

```

DEFINE INSTRUMENT GT1D()
DECLARE
%{
%}
TRACE
COMPONENT Fuente_de_distribuciones = Source_builderX( filename_XY="XY3.txt") AT (0,0,0) ABSOLUTE
COMPONENT ...
END

```

Figura 4.25: Ejemplo de instrumento para generar una fuentes de distribuciones.

Capítulo 5

Obtención de resultados en los puntos de utilización

Tras la creación de las fuentes de distribuciones a partir de la información estadística obtenida de las fuentes de tracks, con corridas de 10^9 partículas se estudió las características de la corriente en los puntos de utilización de los haces. A continuación se presentan múltiples figuras con las magnitudes más relevantes junto a su correspondiente análisis. En la Tabla [5.1](#), se presentan dichas magnitudes y su correspondiente interpretación física. Además, a fin de obtener valores integrales en los puntos de utilización de los haces, se calculó el resto de las magnitudes presentadas en la misma tabla. Para una mejor comprensión acerca de las magnitudes calculadas véase el Apéndice [A](#).

Tabla 5.1: Magnitudes graficadas y calculadas en los puntos de utilización de los haces.

Magnitud distribucional graficada	Interpretación física
$J^+(E) [\frac{n}{cm^2.s.meV}]$	Distribución espectral de la corriente promediada espacialmente sobre una dada sección.
$J_{E1-E2}^+(x', y') [\frac{n}{cm^2.s}]$	Distribución espacial de la corriente integrada en el intervalo de energías correspondiente a un dado macrogrupo, promediada en el área de la microzona correspondiente a la posición $(x'; y')$. En el caso en que no se especifica una energía corresponde a un intervalo entre 0 y la energía especificada.
$J_{E1-E2}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu) [\frac{n}{cm^2.s.sr}]$	Distribución en μ de la corriente integrada en el intervalo de energías correspondiente a un dado macrogrupo para la posición $(x'; y')$ correspondiente a la macrozona ij promediada espacialmente en dicha zona.
Magnitud integral calculada	Interpretación física
$J^+ [\frac{n}{cm^2.s}]$	Corriente saliente promediada sobre la sección de salida del conducto o la guía, según el haz en estudio.
$J_{E1-E2}^+ [\frac{n}{cm^2.s}]$	Corriente saliente integrada en el intervalo de energías $[E1; E2]$ promediada sobre la sección de salida del conducto o la guía, según el haz en estudio.
F	Relación entre J^+ dada por la fuente de distribuciones respecto la J^+ dada por la fuente de tracks.
F_{E1-E2}	Relación entre J_{E1-E2}^+ dada por la fuente de distribuciones respecto la J_{E1-E2}^+ dada por la fuente de tracks.
$< E > [meV]$	Energía promedio de la distribución espectral.
$E_{mp} [meV]$	Energía más probable en la distribución espectral.

5.1. GF1

La Figura 5.1 muestra las distintas posiciones de experimento empleadas en la caracterización de GF1. Se emplea el sistema de coordenadas (x', y', z') situado a la salida de la guía.

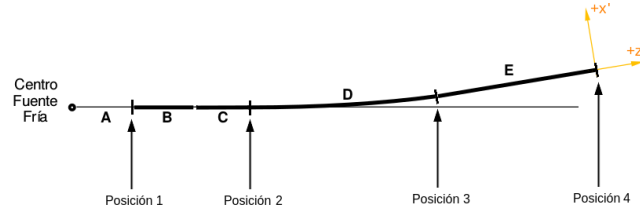
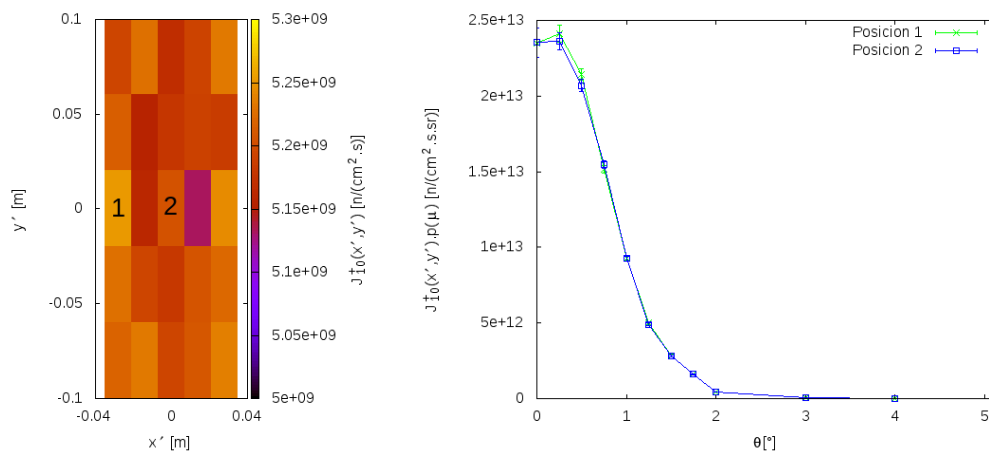


Figura 5.1: Posiciones de experimento en GF1.

Se presentan en la Tabla 5.2 las magnitudes calculadas para el haz GF1. A continuación, se grafican para la posición de experimento 4 $J_{10}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ en la Figura 5.2(b) para las dos posiciones sobre el detector indicadas en la Figura 5.2(a), $J_{E1-E2}^+(x', y')$ para los dos primeros macrogrupos en la Figura 5.3 y $J^+(E)$ en la Figura 5.4.

Tabla 5.2: Magnitudes calculadas en GF1.

Posición de experimento	Magnitud	Valor calculado para tracks	Valor calculado para distribuciones	F
1	J^+	5.15×10^{11}	5.21×10^{11}	1.012
2	J^+	2.50×10^{10}	2.35×10^{10}	0.9432
3	J^+	8.65×10^9	7.97×10^9	0.9211
4	J^+	6.39×10^9	5.87×10^9	0.9178
4	J_{10}^+	5.60×10^9	5.21×10^9	0.9297
4	J_{10-300}^+	7.90×10^8	6.57×10^8	0.8315
4	$\langle E \rangle$		5.02	
4	E_{mp}		1.14	



(a) $J_{10}^+(x', y')$ discretizada en macrozonas. (b) $J_{10}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ para distintas posiciones $(x'_i; y'_j)$.

Figura 5.2: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GF1.

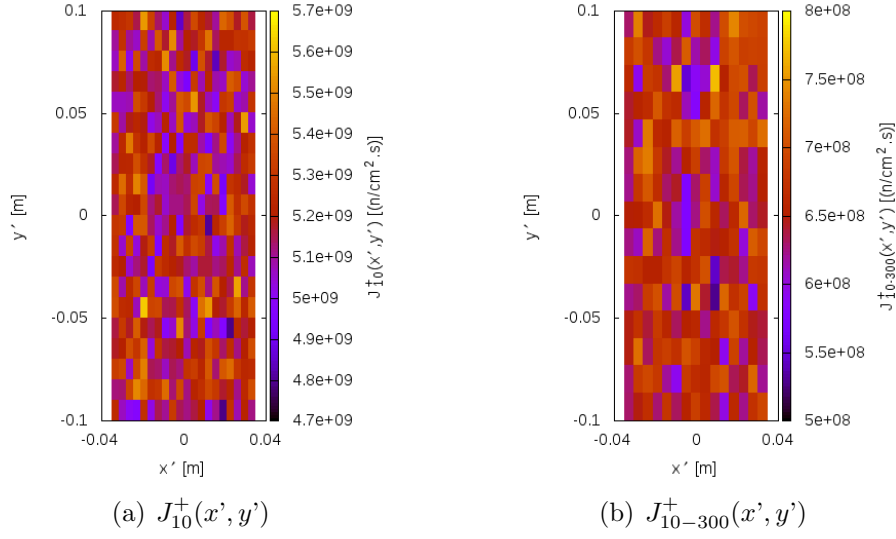


Figura 5.3: $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GF1.

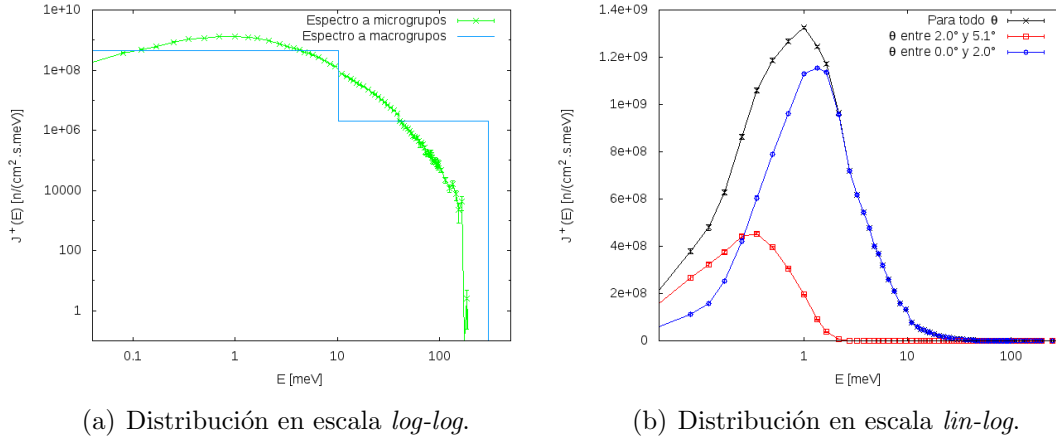


Figura 5.4: Distribución espectral a la salida de la guía en GF1.

5.2. GF2

La Figura 5.5 muestra las distintas posiciones de experimento empleadas en la caracterización de GF2.

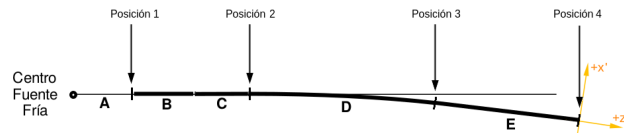


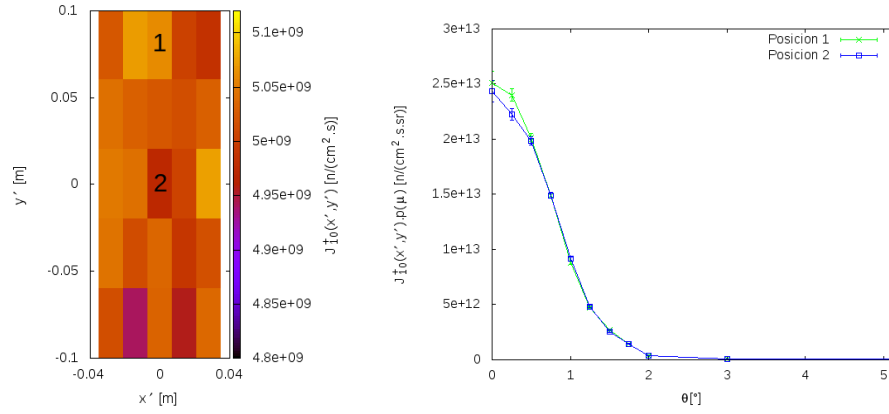
Figura 5.5: Posiciones de experimento en GF2.

Se presentan en la Tabla 5.3 las magnitudes calculadas para el haz GF2. A continuación, se grafican para la posición de experimento 4 $J_{10}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ en la Figura 5.6(b) para las dos posiciones sobre el detector indicadas en la Figura 5.6(a), $J_{E1-E2}^+(x', y')$

para los dos primeros macrogrupos en la Figura 5.7 y $J^+(E)$ en la Figura 5.8.

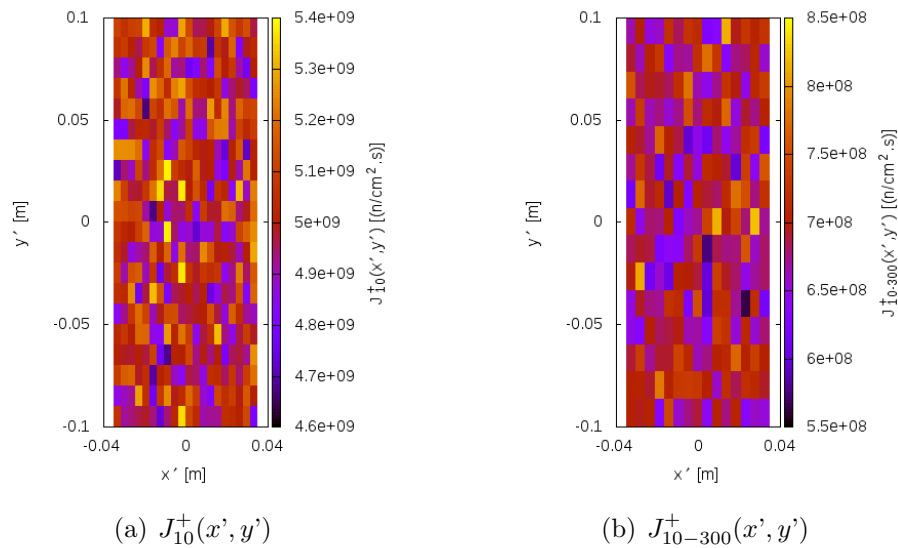
Tabla 5.3: Magnitudes calculadas en GF2.

Posición de experimento	Magnitud	Valor calculado para tracks	Valor calculado para distribuciones	F
1	J^+	5.20×10^{11}	5.29×10^{11}	1.020
2	J^+	2.42×10^{10}	2.35×10^{10}	0.9710
3	J^+	8.31×10^9	7.75×10^9	0.9360
4	J^+	6.15×10^9	5.71×10^9	0.9317
4	J_{10}^+	5.42×10^9	5.02×10^9	0.9305
4	J_{10-300}^+	7.34×10^8	6.89×10^8	0.9405
4	$\langle E \rangle$		5.23	
4	E_{mp}		1.00	



(a) $J_{10}^+(x', y')$ discretizada en macro-zonas. (b) $J_{10}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ para distintas posiciones $(x'_i; y'_j)$.

Figura 5.6: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GF2.



(a) $J_{10}^+(x', y')$

(b) $J_{10-300}^+(x', y')$

Figura 5.7: $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GF2.

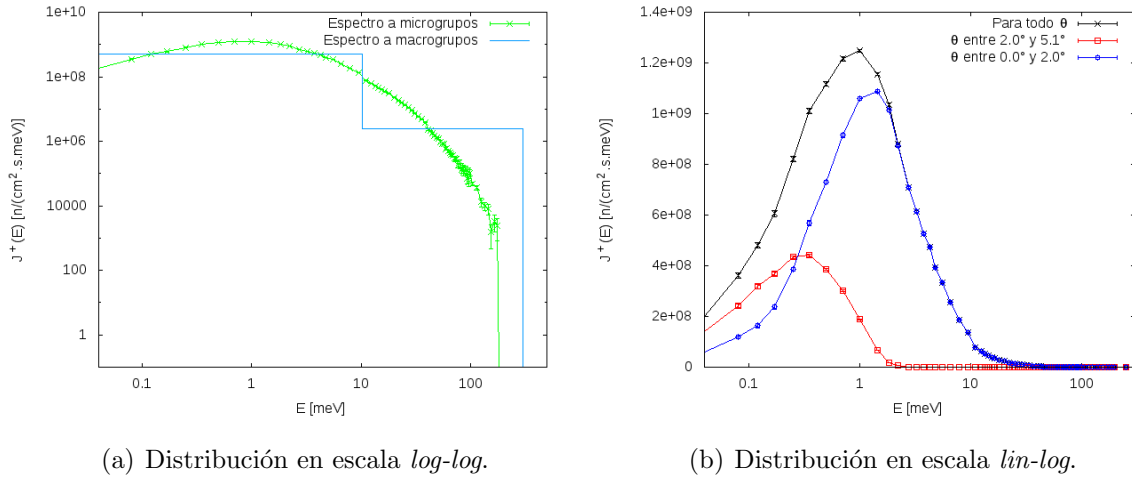


Figura 5.8: Distribución espectral a la salida de la guía en GF2.

5.3. Observaciones sobre GF1 y GF2

Dada la similitud entre los resultados de GF1 y de GF2 se realiza un análisis en forma simultánea para ambos haces. Se observa que la corriente en distintas posiciones sobre el detector presenta la misma distribución en μ . Dicha distribución se centra en $\theta = 0^\circ$ y a partir de $\theta = 2^\circ$ deja de ser considerable. Notar que el uso de guías trae como consecuencia que sólo se transmitan neutrones en un intervalo muy acotado de ángulos. Además, la distribución espacial es considerada uniforme, conclusión obtenida a través de los gráficos de $J_{10}^+(x', y')$ y de $J_{10}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$. La distribución en μ permite llegar a dicha conclusión al notar la similitud entre las curvas, la cual trae aparejada que la integral de las mismas en todo μ tenga el mismo valor, el cual corresponde al valor de $J_{10}^+(x'_i, y'_j)$ para dicha posición. En otras palabras, la distribución en μ no está correlacionada a la variable espacial. Este fenómeno es consecuencia del mezclado de rayos generado por la utilización de guías rectas suficientemente largas.

En cuanto a la distribución espectral, se advierten dos puntos importantes. El primero es que se observa un enfriamiento por el uso de guías. En este caso, kT toma un valor aproximado de 1 meV , mientras que a la entrada de la guía (véase Sección 4.2.1) kT ronda los 3.75 meV . El segundo punto a notar es la fuerte correlación entre las variables μ y E . Neutrones más colimados presentan un espectro más energético que neutrones menos colimados. En otras palabras, a mayor θ respecto del eje principal de la guía al cual se sitúe un experimento a la salida de la misma, más “fría” será la distribución espectral de los neutrones que le lleguen. Esto resulta consecuencia de que la guía permite la reflexión de neutrones con alta energía solo si tienen un bajo θ (véase Sección 1.4).

5.4. GF3

La Figura 5.9 muestra las distintas posiciones de experimento empleadas en la caracterización de GF3. Se emplea el sistema de coordenadas (x', y', z') mostrado en dicha figura.

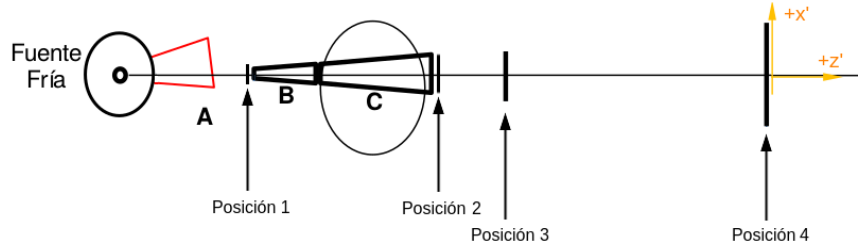


Figura 5.9: Posiciones de experimento en GF3.

Se presentan en la Tabla 5.4 las magnitudes calculadas para el haz GF3. A continuación, se grafican para la posición de experimento 2 $J_{10}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ en la Figura 5.10(b) para las dos posiciones sobre el detector indicadas en la Figura 5.10(a), $J_{E1-E2}^+(x', y')$ para los dos primeros macrogrupos en la Figura 5.11 y $J^+(E)$ en la Figura 5.12.

Tabla 5.4: Magnitudes calculadas en GF3.

Posición de experimento	Magnitud	Valor calculado para tracks	Valor calculado para distribuciones	F
1	J^+	2.33×10^{11}	2.49×10^{11}	1.075
2	J^+	5.73×10^8	5.49×10^8	0.9640
2	J_{10}^+	2.86×10^8	2.41×10^8	0.8470
2	J_{10-300}^+	2.44×10^8	2.63×10^8	1.086
2	$J_{300-5 \times 10^8}^+$	4.11×10^7	4.20×10^7	1.027
2	$J_{5 \times 10^8-2 \times 10^{10}}^+$	2.19×10^6	3.09×10^6	1.420
3	J^+	1.90×10^8	1.62×10^8	0.8573
4	J^+	3.42×10^7	3.75×10^7	1.101
4	J_{10}^+	2.02×10^7	1.72×10^7	0.8558
4	J_{10-300}^+	1.50×10^7	1.73×10^7	1.1585
4	$J_{300-5 \times 10^8}^+$	2.54×10^6	2.75×10^6	1.0885
4	$J_{5 \times 10^8-2 \times 10^{10}}^+$	3.68×10^5	2.10×10^5	0.5734
2	$\langle E \rangle$		1.57×10^7	
2	$\langle E \rangle_{10}$		4.73	
2	$\langle E \rangle_{10-300}$		45.09	
2	E_{mp}		2.4	

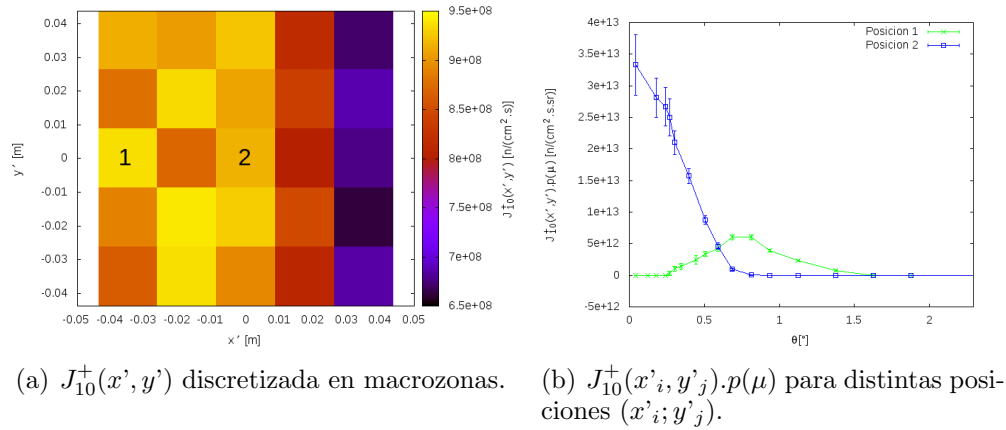


Figura 5.10: Dependencia espacial y angular de la corriente en la posición de experimento 2 en GF3.

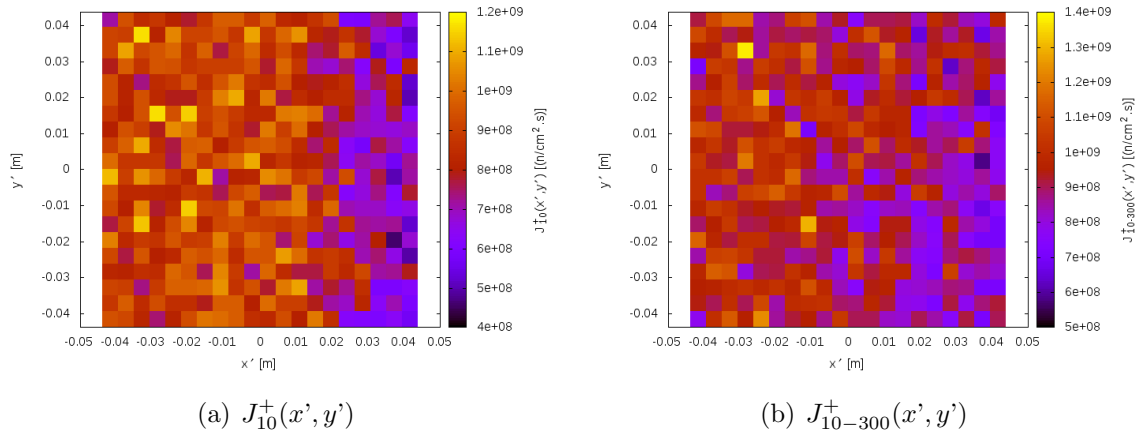


Figura 5.11: $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas en la posición de experimento 2 en GF3.

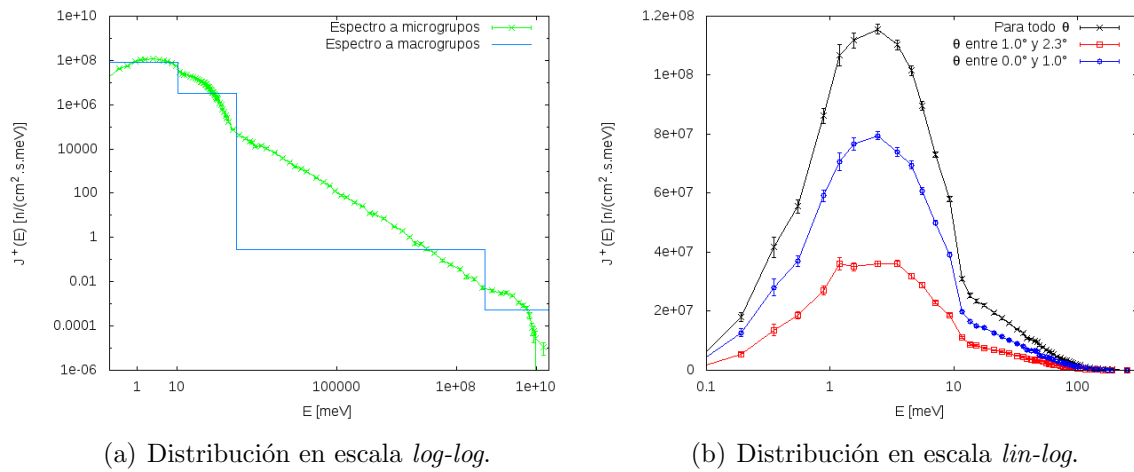


Figura 5.12: Distribución espectral en la posición de experimento 2 en GF3.

A su vez, se grafica para la posición de experimento 3 $J_{E1-E2}^+(x', y')$ los dos primeros

macrogrupos, las cuales se exhiben en la Figura 5.13.

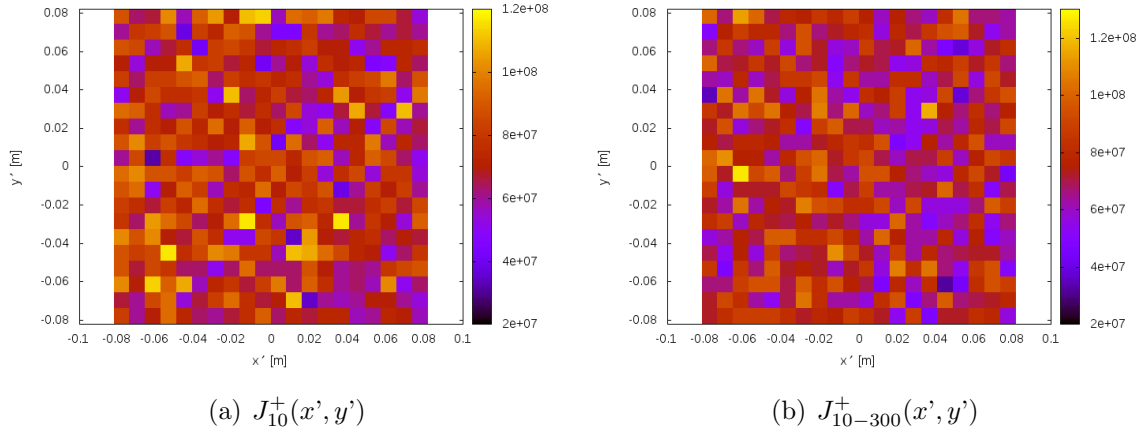


Figura 5.13: $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas en la posición de experimento 3 en GF3.

Por otro lado, se grafican para la posición de experimento 4 $J_{10}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ en la Figura 5.14(b) para las dos posiciones sobre el detector indicadas en la Figura 5.14(a), $J_{E1-E2}^+(x', y')$ para los dos primeros macrogrupos en la Figura 5.15 y $J^+(E)$ en la Figura 5.16.

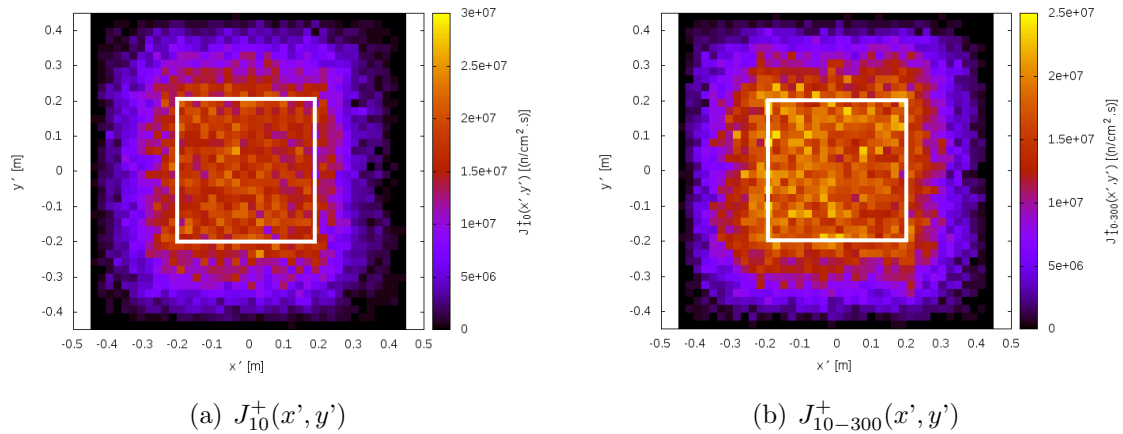


Figura 5.15: $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas en la posición de experimento 4 en GF3.

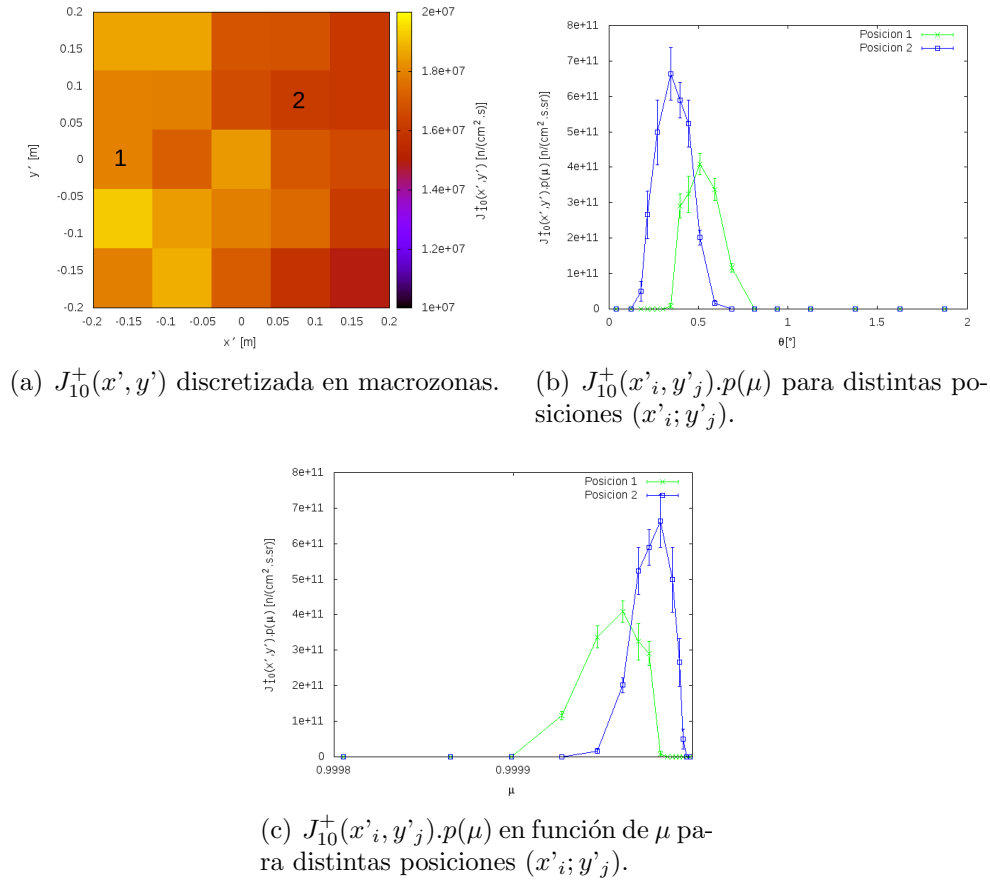


Figura 5.14: Dependencia espacial y angular de la corriente en la posición de experimento 4 en GF3.

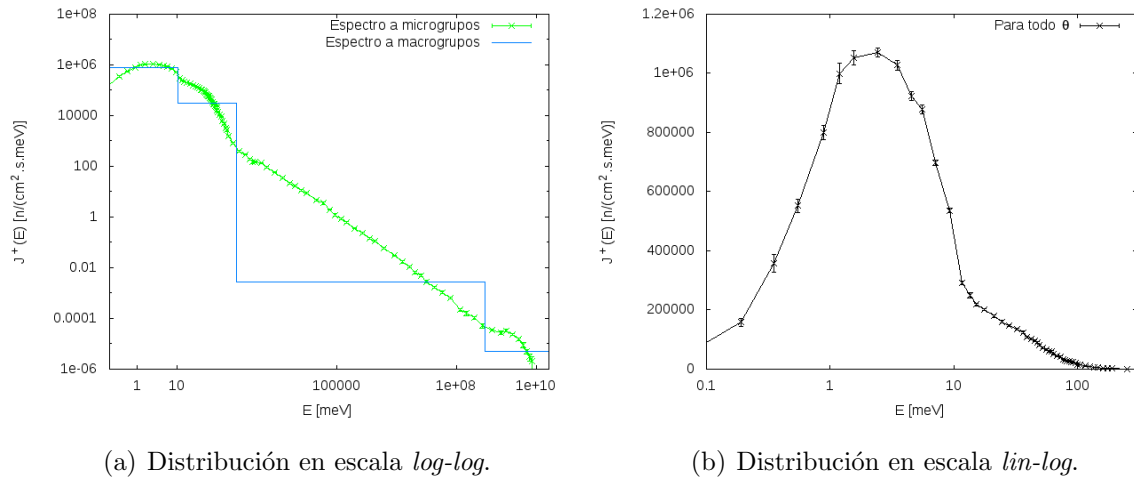


Figura 5.16: Distribución espectral en la posición de experimento 4 en GF3.

5.5. Observaciones sobre GF3

Referente a la posición de experimento 2, la distribución espacial de la corriente presenta un gradiente tanto para neutrones fríos como térmicos. Este efecto es conse-

cuencia de que el lado derecho del detector tiene mayor visión del lateral del conducto de extracción, ver Figura 5.17. Finalmente, la distribución espacial de la corriente en las posiciones del experimento 3 y 4 es considerable uniforme dentro de las dimensiones de placa correspondientes a cada posición (ver Figura 5.15). Esto se debe a que el colimador no permite que las placas tengan visión de los laterales del conducto de extracción, ver Figura 5.17.

Con lo que respecta a la distribución espectral, se aprecia que tanto a la salida del colimador (posición de experimento 2) como en la posición de la placa a 18 metros (posición de experimento 4) dicha distribución es la misma. A su vez, se nota que este espectro es el correspondiente al de la entrada del colimador para neutrones de bajo ángulo (véase Sección 4.2.2).

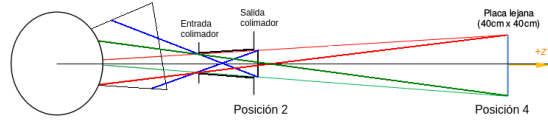


Figura 5.17: Trazado de rayos para placas en posición de experimento 2 y 4.

5.6. GF4

La Figura 5.18 muestra las distintas posiciones de experimento empleadas en la caracterización de GF4. Se emplea el sistema de coordenadas (x', y', z') mostrado en dicha figura.

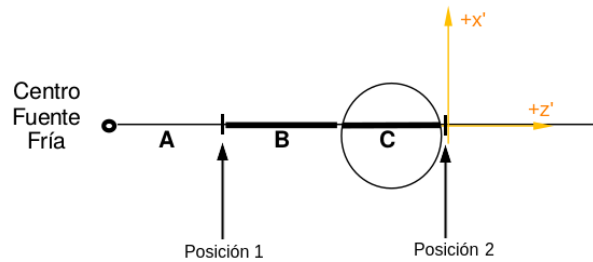
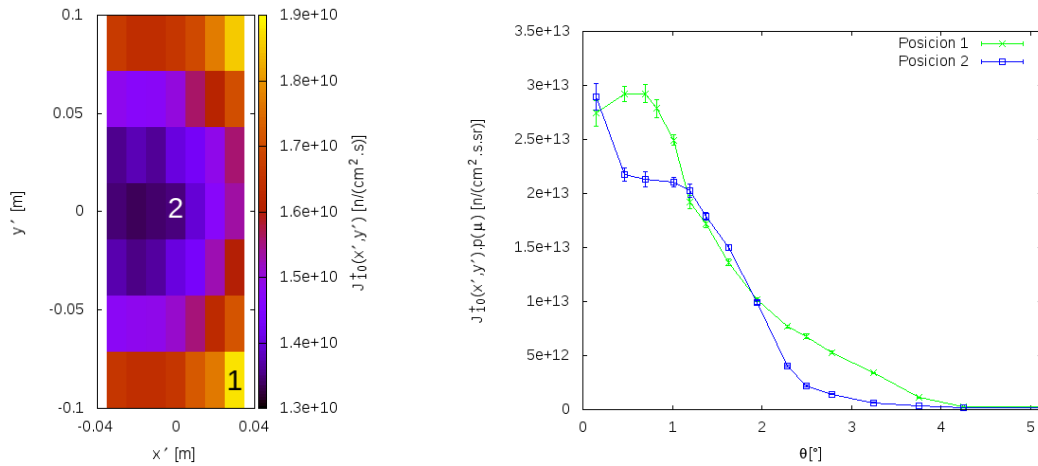


Figura 5.18: Posiciones de experimento en GF4.

Se presentan en la Tabla 5.5 las magnitudes calculadas para el haz GF4. A continuación, se grafican para la posición de experimento 2 $J_{10}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ en la Figura 5.19(b) para las dos posiciones sobre el detector indicadas en la Figura 5.19(a), $J_{E1-E2}^+(x', y')$ para todos los macrogrupos en la Figura 5.20 y $J^+(E)$ en la Figura 5.21.

Tabla 5.5: Magnitudes calculadas en GF4.

Posición de experimento	Magnitud	Valor calculado para tracks	Valor calculado para distribuciones	F
1	J^+	4.98×10^{11}	5.07×10^{11}	1.018
2	J^+	2.91×10^{10}	2.69×10^{10}	0.9252
2	J_{10}^+	1.81×10^{10}	1.53×10^{10}	0.8491
2	J_{10-300}^+	9.47×10^9	10.19×10^9	1.076
2	$J_{300-5 \times 10^8}^+$	1.44×10^9	1.29×10^9	0.8937
2	$J_{5 \times 10^8-2 \times 10^{10}}^+$	1.20×10^8	1.01×10^8	0.8411
4	$\langle E \rangle$	1.11×10^7		
4	$\langle E \rangle_{10}$	3.71		
4	$\langle E \rangle_{10-300}$	42.75		
4	E_{mp}	1.13		



(a) $J_{10}^+(x', y')$ discretizada en macrozonas. (b) $J_{10}^+(x_i, y_j).p(\mu)$ para distintas posiciones (x_i, y_j) .

Figura 5.19: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GF4.

5.7. Observaciones sobre GF4

Se aprecia que la distribución espacial para los neutrones fríos toma la forma de una “C” reflejada. Este fenómeno es característico de haces con guías cortas, donde los neutrones colisionan una sola vez con la guía y dado que aquellos que son reflejados poseen ángulos bajos, si la guía no excede determinada longitud, los neutrones permanecen relativamente cerca del espejo. La asimetría con respecto al eje y' es consecuente al desalineado de 4° entre la normal de la fuente y la guía. La distribución en μ para la posición inferior derecha sobre el detector (ver Figura 5.19(b)), está centrada en un valor de θ de aproximadamente 0.7° , lo cual confirma que los neutrones transportados cercanos al espejo poseen bajo ángulo. La distribución espacial para el caso de los neutrones térmicos tiene una simetría respecto del eje y' . Se puede observar que la intensidad en los laterales es superior. Esto vuelve a ser una consecuencia de que los

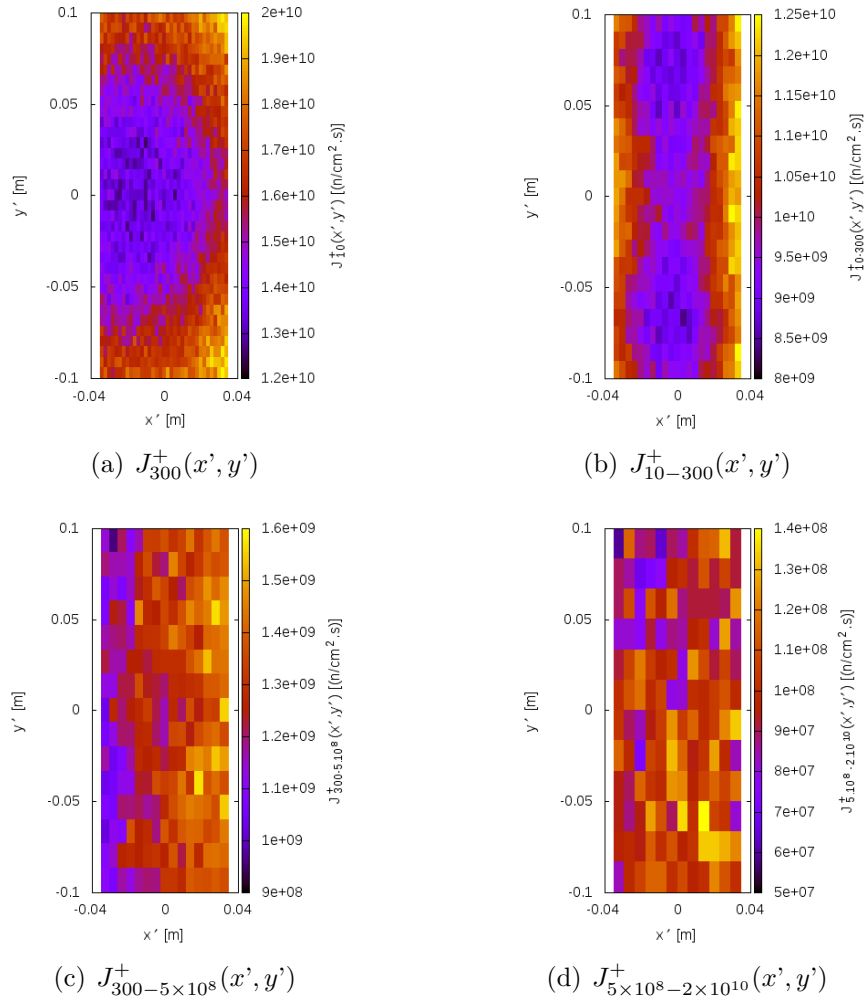


Figura 5.20: $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GF4.

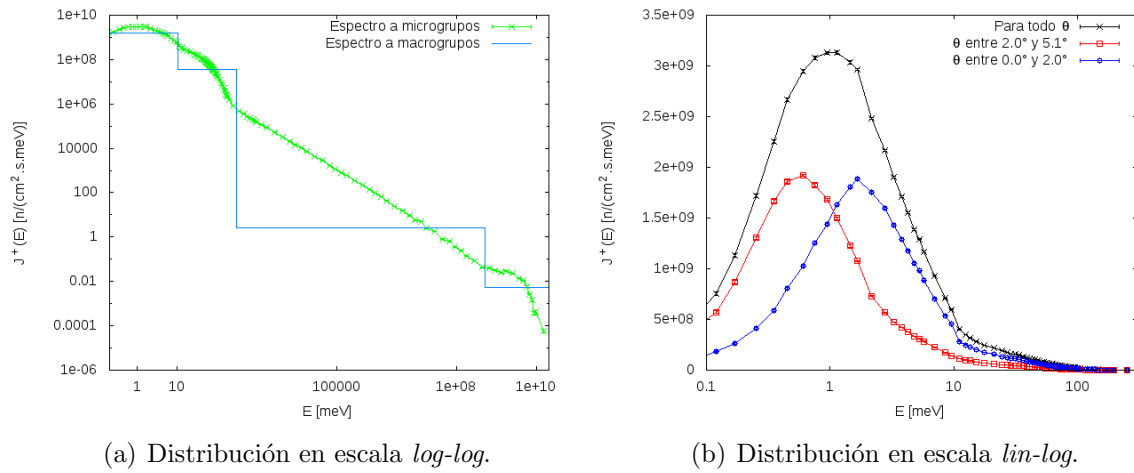


Figura 5.21: Distribución espectral a la salida de la guía en GF4.

neutrones que son transportados por la guía son de bajo ángulo y permanecen cercanos a los espejos tras colisionar una sola vez. A diferencia del caso frío, la distribución a la entrada de la guía es más uniforme y eso genera la simetría respecto al eje y' observada

a la salida.

Finalmente, se observa que la distribución espectral es más “fría” que el espectro a bajo ángulo visto a la entrada de la guía (véase Sección 4.2.2). A pesar de la corta longitud de la guía, sigue habiendo un cierto enfriamiento producido por la misma. A su vez, se distingue el espectro para los neutrones más colimados, el cual corresponde a neutrones de visión directa. Por lo tanto, dicho espectro es similar al de la fuente para bajos ángulos. También se observa el espectro para los neutrones menos colimados, el cual es más frío que el anterior debido al efecto de enfriamiento ya mencionado.

5.8. GT1

La Figura 5.22 muestra las distintas posiciones de experimento empleadas en la caracterización de GT1. Se emplea el sistema de coordenadas (x', y', z') situado a la salida de la guía.

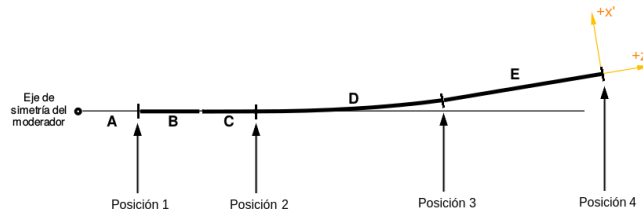
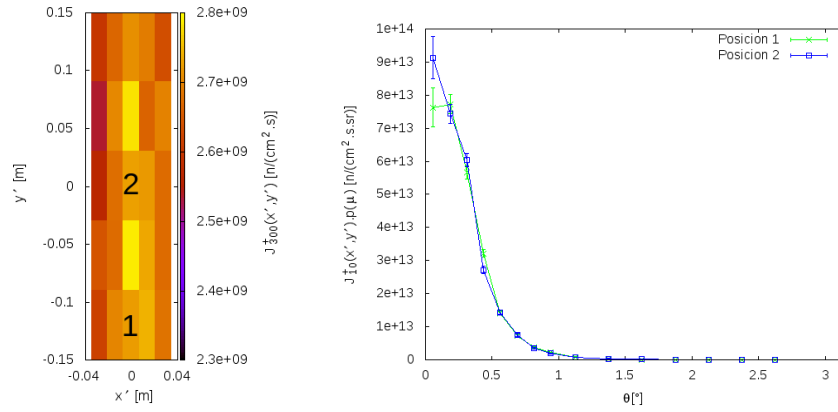


Figura 5.22: Posiciones de experimento en GT1.

Se presentan en la Tabla 5.6 las magnitudes calculadas para el haz GT1. A continuación, se grafican para la posición de experimento 4 $J_{300}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ en la Figura 5.23(b) para las dos posiciones sobre el detector indicadas en la Figura 5.23(a), $J_{E1-E2}^+(x', y')$ para el macrogrupo entre 0 y 300 meV en la Figura 5.24 y $J^+(E)$ en la Figura 5.25.

Tabla 5.6: Magnitudes calculadas en GT1.

Posición de experimento	Magnitud	Valor calculado para tracks	Valor calculado para distribuciones	F
1	J^+	1.47×10^{12}	1.52×10^{12}	1.035
2	J^+	4.99×10^{10}	4.83×10^{10}	0.9690
3	J^+	3.06×10^9	3.06×10^9	0.9728
4	J^+	2.77×10^9	2.70×10^9	0.9737
4	J_{100}^+	2.71×10^9	2.66×10^9	0.9812
4	J_{300}^+	2.77×10^9	2.69×10^9	0.9731
4	$\langle E \rangle$		29.8	
4	E_{mp}		7.0	



(a) $J_{300}^+(x', y')$ discretizada en macrozonas. (b) $J_{300}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ para distintas posiciones $(x'_i; y'_j)$.

Figura 5.23: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GT1.

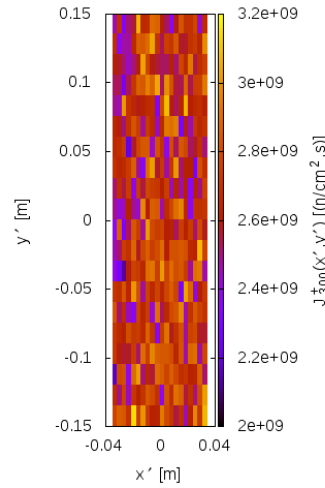
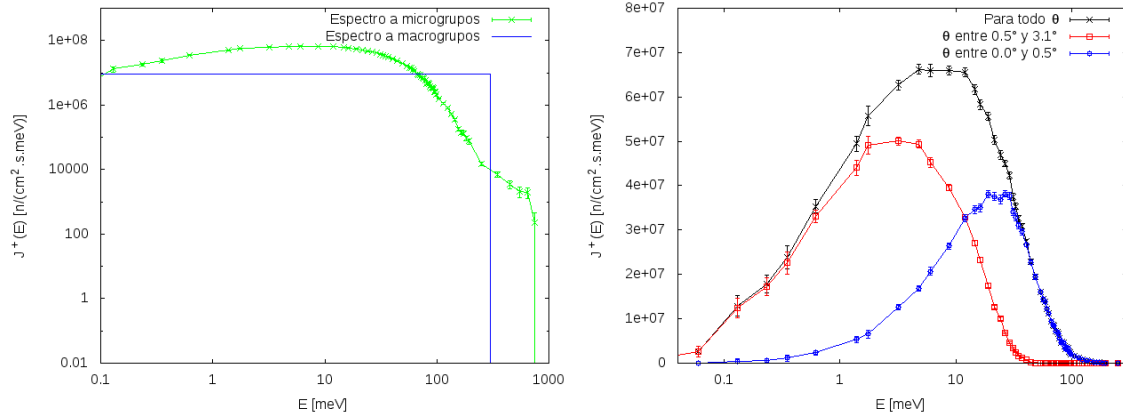


Figura 5.24: $J_{300}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GT1.



(a) Distribución en escala *log-log*.

(b) Distribución en escala *lin-log*.

Figura 5.25: Distribución espectral a la salida de la guía en GT1.

5.9. GT2

La Figura 5.26 muestra las distintas posiciones de experimento empleadas en la caracterización de GT2.

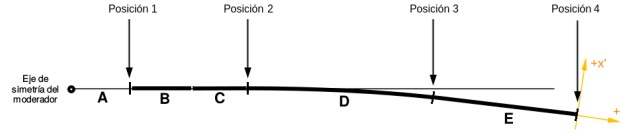
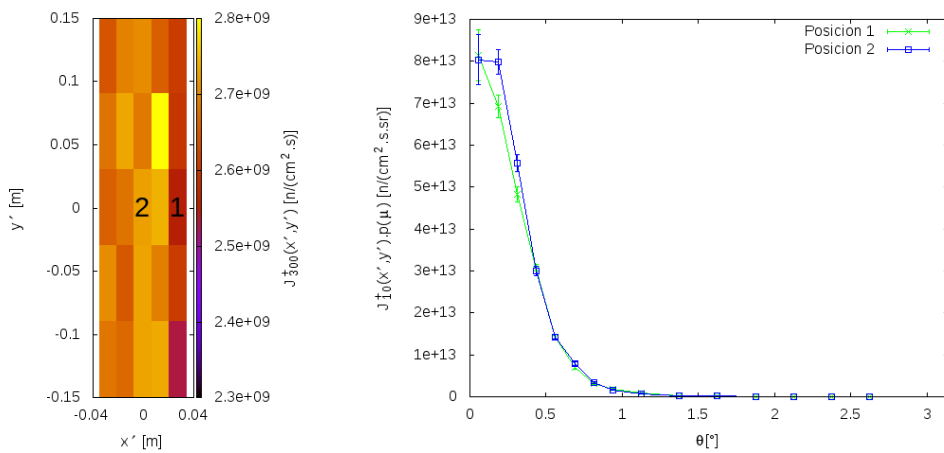


Figura 5.26: Posiciones de experimento en GT2.

Se presentan en la Tabla 5.7 las magnitudes calculadas para el haz GT2. A continuación, se grafican para la posición de experimento 4 $J_{300}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ en la Figura 5.27(b) para las dos posiciones sobre el detector indicadas en la Figura 5.27(a), $J_{E1-E2}^+(x', y')$ para el macrogrupo entre 0 y 300 meV en la Figura 5.28 y $J^+(E)$ en la Figura 5.29.

Tabla 5.7: Magnitudes calculadas en GT2.

Posición de experimento	Magnitud	Valor calculado para tracks	Valor calculado para distribuciones	F
1	J^+	1.42×10^{12}	1.45×10^{12}	1.031
2	J^+	5.05×10^{10}	4.74×10^{10}	0.9430
3	J^+	3.12×10^9	2.96×10^9	0.9531
4	J^+	2.83×10^9	2.68×10^9	0.9505
4	J_{100}^+	2.77×10^9	2.60×10^9	0.9403
4	J_{300}^+	2.83×10^9	2.68×10^9	0.9502
4	$\langle E \rangle$		29.78	
4	E_{mp}		6.35	



(a) $J_{300}^+(x', y')$ discretizadas en macrozonas. (b) $J_{300}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ para distintas posiciones (x'_i, y'_j) .

Figura 5.27: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida de la guía en GT2.

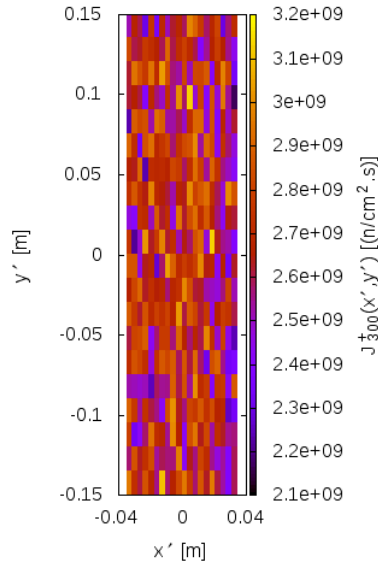
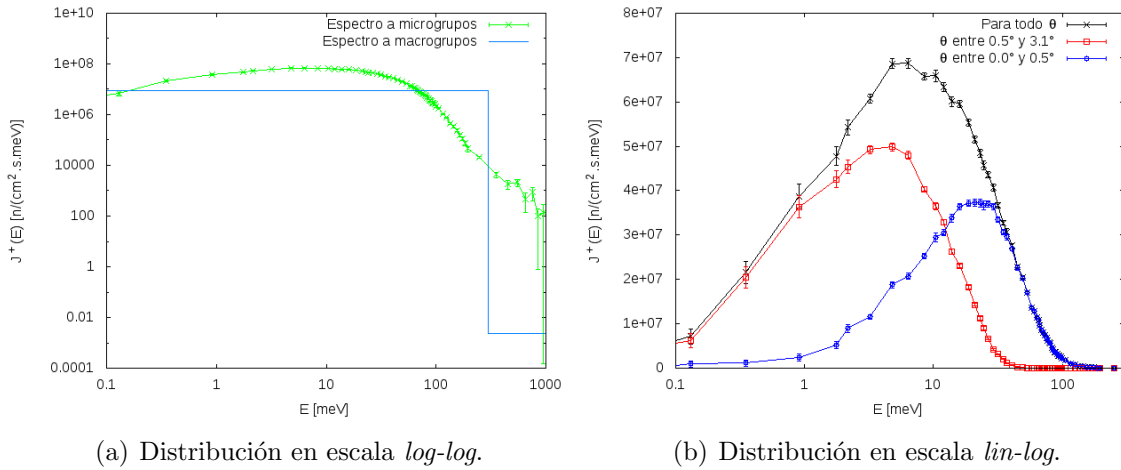


Figura 5.28: $J_{300}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida de la guía en GT2.



(a) Distribución en escala *log-log*.

(b) Distribución en escala *lin-log*.

Figura 5.29: Distribución espectral a la salida de la guía en GT2.

5.10. Observaciones sobre GT1 y GT2

Se realiza un análisis en conjunto para GT1 y GT2 debido a su gran parecido. Ambos haces presentan una distribución espacial de la corriente uniforme a la salida de las guías. A su vez, se observa la distribución en θ para distintas posiciones sobre el detector y se concluye que la corriente presenta una distribución angular independiente de la variable espacial. La distribución espectral se encuentra “desplazada” hacia la izquierda (debido al enfriamiento por guía). En este caso kT resulta de aproximadamente 7 meV mientras que a la entrada de la guía es aproximadamente 27 meV (véase Sección 4.2.3).

5.11. GT3

La Figura 5.30 muestra las distintas posiciones de experimento empleadas en la caracterización de GT3.

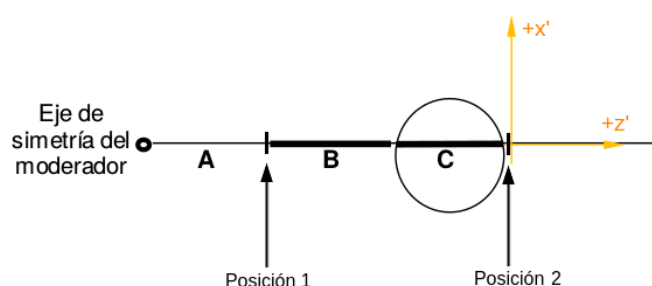
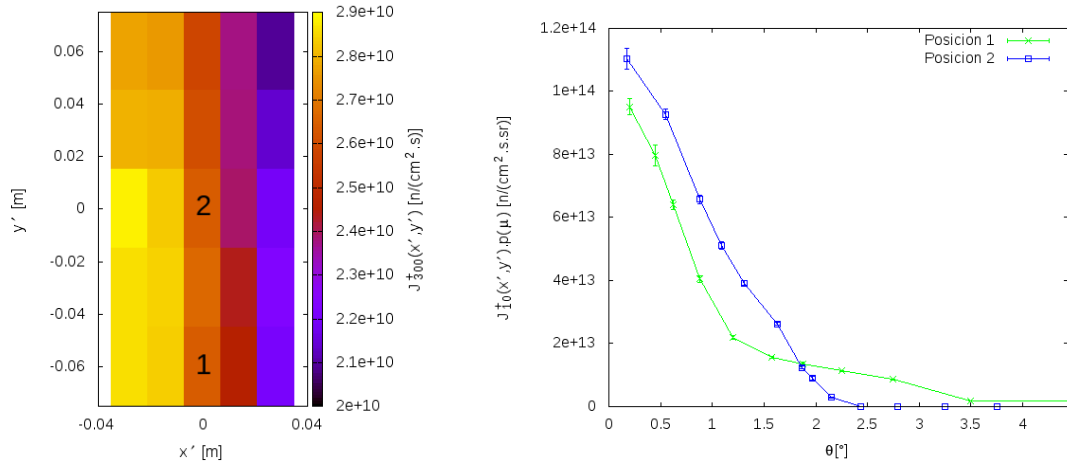


Figura 5.30: Posiciones de experimento en GT3.

Se presentan en la Tabla 5.8 las magnitudes calculadas para el haz GT3. A continuación, se grafican para la posición de experimento 2 $J_{300}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ en la Figura 5.31(b) para las dos posiciones sobre el detector indicadas en la Figura 5.31(a), $J_{E1-E2}^+(x', y')$ para todos los macrogrupos en la Figura 5.32 y $J^+(E)$ en la Figura 5.33.

Tabla 5.8: Magnitudes calculadas en GT3.

Posición de experimento	Magnitud	Valor calculado para tracks	Valor calculado para distribuciones	F
1	J^+	5.50×10^{11}	5.76×10^{11}	1.049
2	J^+	4.14×10^{10}	3.92×10^{10}	0.9495
2	J_{100}^+	2.24×10^{10}	2.13×10^{10}	0.9501
2	J_{300}^+	2.71×10^{10}	2.57×10^{10}	0.9518
2	$J_{300-5 \times 10^8}^+$	1.32×10^{10}	1.23×10^{10}	0.9299
2	$J_{5 \times 10^8-2 \times 10^{10}}^+$	1.11×10^9	1.25×10^9	1.125
2	$\langle E \rangle$		6.69×10^7	
2	$\langle E \rangle_{>300}$		62.01	
2	E_{mp}		31.5	



(a) $J_{300}^+(x', y')$ discretizada en macrozonas. (b) $J_{300}^+(x'_i, y'_j) \cdot p(\mu)$ para distintas posiciones $(x'_i; y'_j)$.

Figura 5.31: Dependencia espacial y angular de la corriente a la salida del colimador en GT3.

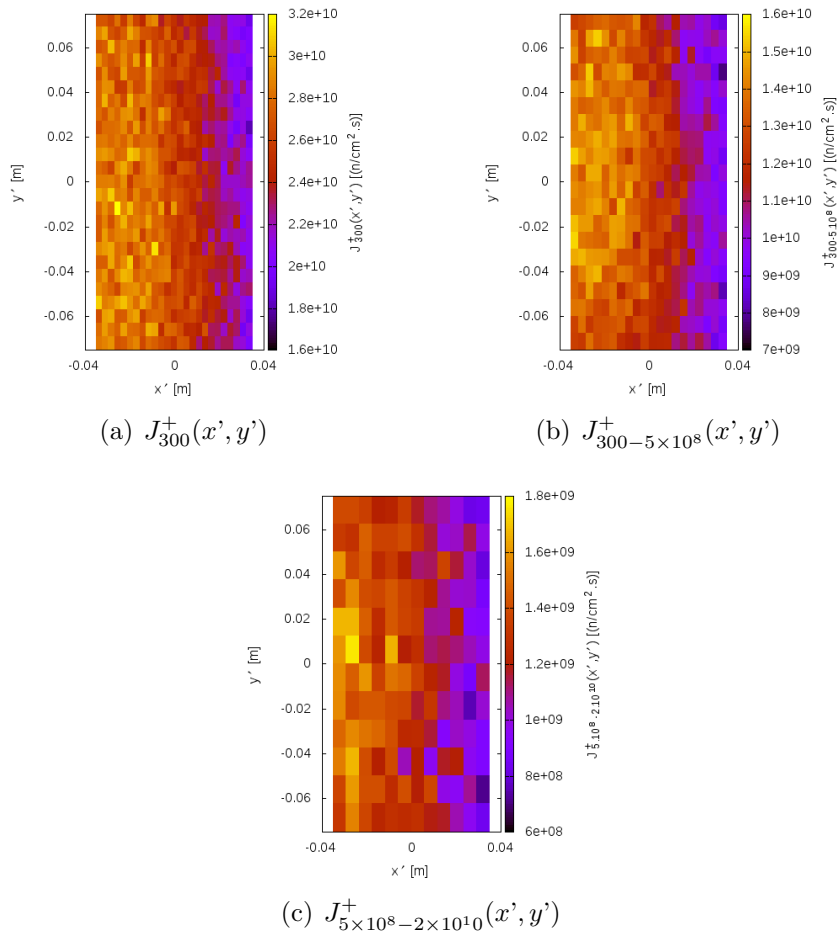


Figura 5.32: $J_{E1-E2}^+(x', y')$ discretizada en microzonas a la salida del colimador en GT3.

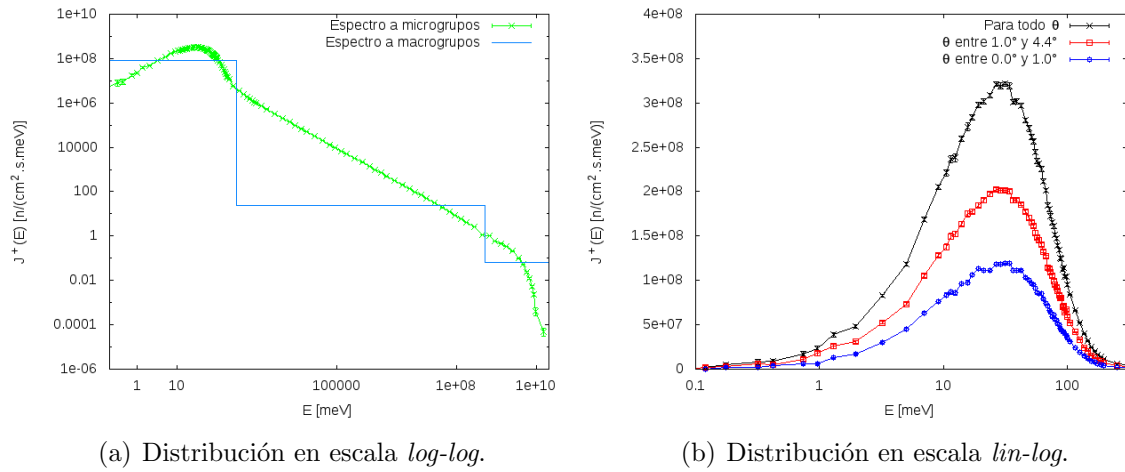


Figura 5.33: Distribución espectral a la salida del colimador en GT3.

5.12. Observaciones sobre GT3

Se observa un marcado gradiente en la distribución espacial hacia la izquierda de la salida del colimador. Este fenómeno es análogo al observado en GF3 en la posición de salida del colimador.

Se puede apreciar que la distribución espectral es la misma que la de entrada al colimador, ver Sección 4.2.4. No se observa una dependencia entre las variables E y μ por los motivos presentados en dicha sección.

Capítulo 6

Estudios complementarios

Con el fin de complementar los análisis realizados a lo largo de este trabajo, se llevó a cabo una serie de estudios tras modificar el componente *Guide-channeled*. Este componente corresponde a una guía de neutrones de sección rectangular con la particularidad de que es posible asignarle características diferentes a los distintos espejos que la componen. En todos los casos estudiados en esta sección los espejos laterales poseen un $m_c = 3.5$, mientras que para los verticales un $m_c = 3$. Una vez modificado el componente, el foco de estudio se centro sobre dos casos particulares, uno para neutrones fríos (GF1) y uno para neutrones térmicos (GT1). A fin de simplificar el análisis, se reemplazó los tres tramos de las guías por un tramo único completamente recto, para ambos haces. La longitud de las guías es de 55 m y 65 m para GF1 y GT1, respectivamente.

A continuación se presentan todos los correspondientes análisis.

6.1. Detector de espectro en impulso

Fue implementado un detector del m de los neutrones. A partir de la Ecuación 1.2, se puede determinar el m correspondiente de la interacción de los neutrones con la guía. Los resultados obtenidos se muestran en la grafica mostrada en la Figura 6.1.

Esta figura permite advertir que a partir de $m=3.5$ la intensidad es muy baja. Debido a que para $m \geq 3.5$ la función de reflectividad decrece considerablemente hasta hacerse 0. También dicha intensidad posee una pequeña componente asociada a neutrones de visión de fuente. La figura también permite notar un cambio de pendiente en ambas curvas para un valor cercano a $m = 3$, consecuente del distinto m_c de los espejos laterales y verticales.

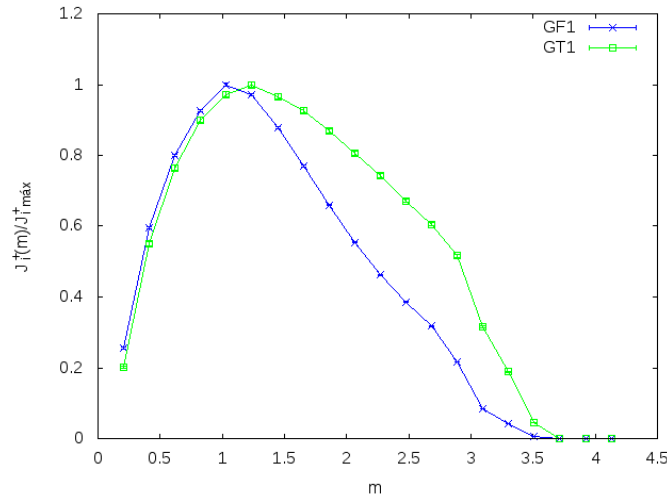


Figura 6.1: J_i^+/J_{iMax}^+ en función del m de los neutrones que atraviesan la guía.

6.2. Detector de energía en función del número de colisiones

Fue implementado un detector capaz clasificar los neutrones incidentes en función del número de colisiones efectuados con la guía y su correspondiente energía. Se presentan los histogramas de la corriente parcial $J^+[n/s]$ a la salida de la guía según el número de colisiones para ambos casos.

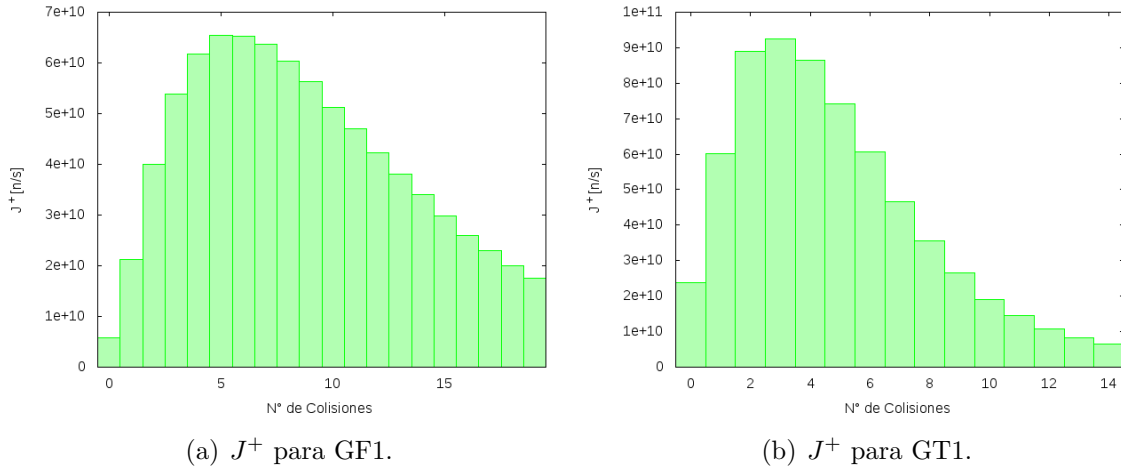
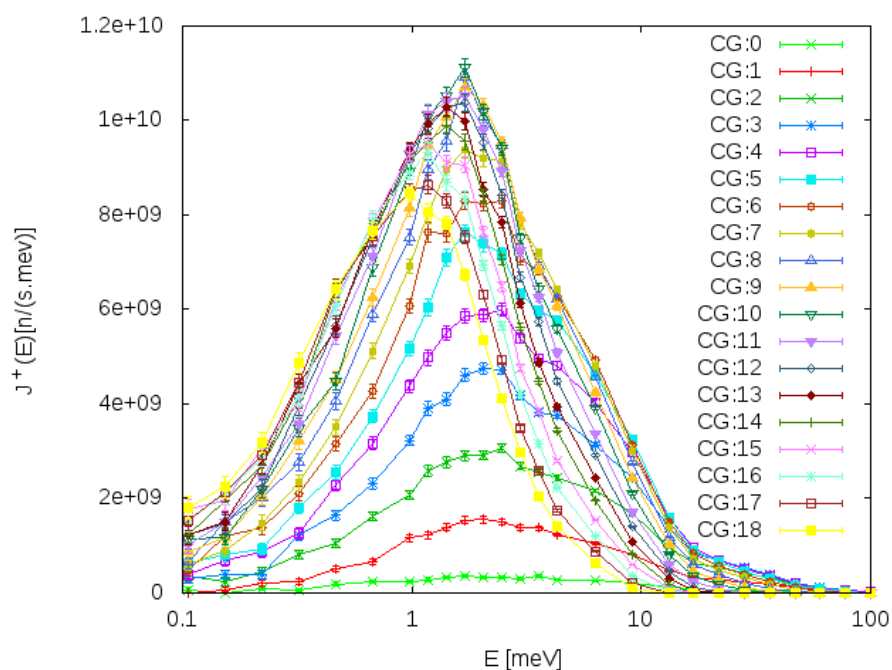


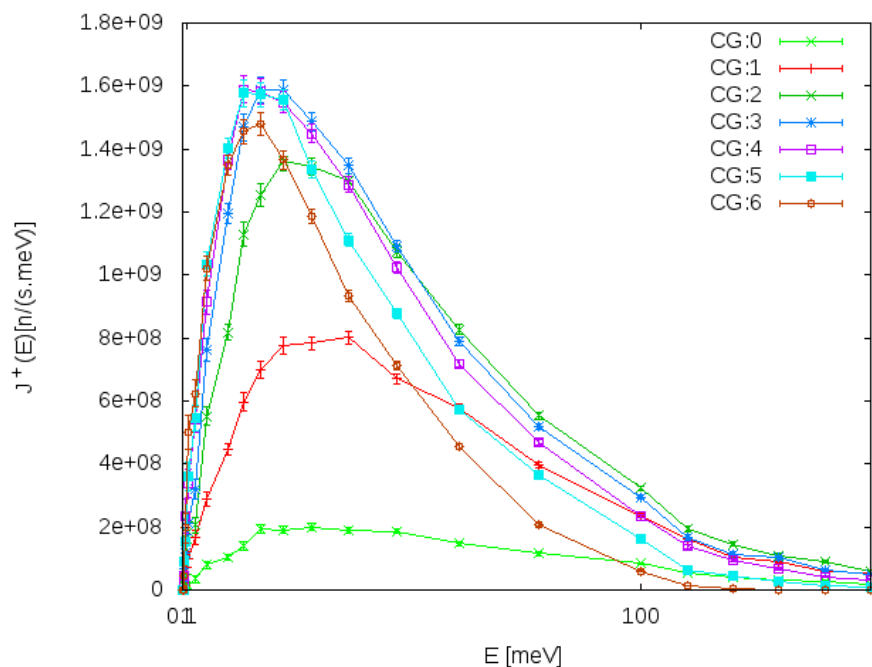
Figura 6.2: Histogramas según número de colisiones dentro de las guías.

El número de colisiones dentro de la guía es un resultado de una convolución entre los siguientes factores. A mayor longitud de guía, mayor número de interacciones. A menor altura de guía, mayor número de interacciones. Cuanto más frío es el espectro, la guía admite neutrones con mayores ángulos, consecuentemente mayor número de interacciones. La combinación de estos efectos hace que el promedio de interacciones en GF1 sea superior al de GT1.

A su vez, se grafica el espectro correspondiente a cada haz, a la salida de la guía, según el número de colisiones dentro de la guía.



(a) $J^+(E)$ para GF1.



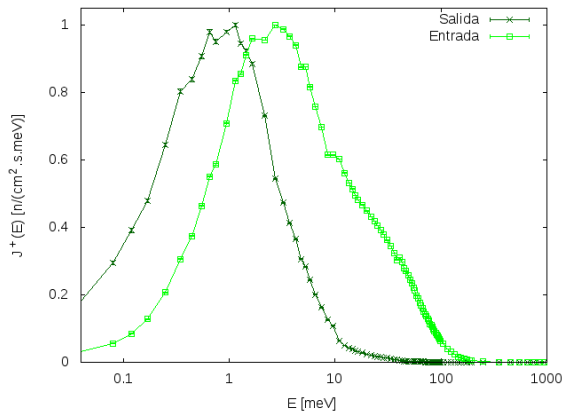
(b) $J^+(E)$ para GT1.

Figura 6.3: Espectros según el número de colisiones.

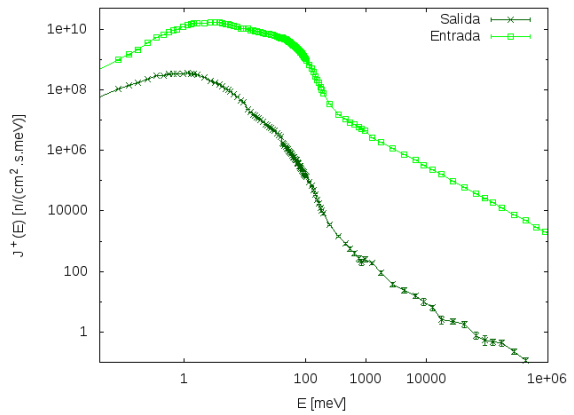
De estas figuras, resulta claro que a medida que aumenta el número de colisiones, los neutrones presentan una distribución espectral menos energética. Esto es consecuencia del enfriamiento por guía. Los neutrones que colisionan más veces son menos colimados

(tienen mayor ángulo de incidencia sobre los espejos). Debido al comportamiento de las guías, dichos neutrones tienen que tener menor energía a mayor ángulo para poder ser transportados.

A fin de observar el enfriamiento producido por la guía, se grafica en las figura 6.4(a) y 6.5(a), el espectro de salida de la guía en conjunto al de entrada. Para facilitar la observación del corrimiento en energías, se grafican ambos espectros en forma normalizada al máximo valor (debido a que ambos espectros presentan órdenes de magnitud diferentes). A su vez, se presentan los espectros con su correspondiente magnitud en escala logarítmica, figuras 6.4(b) y 6.5(b).

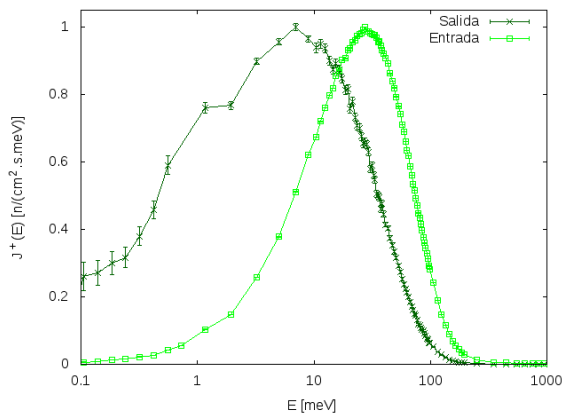


(a) $J^+(E)/J_{max}$.

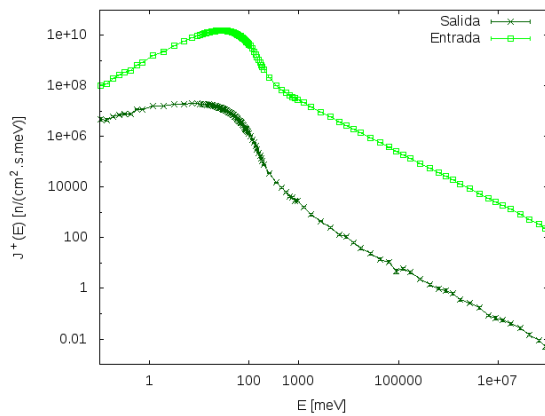


(b) $J^+(E)$.

Figura 6.4: Espectros según el número de colisiones a la entrada y a la salida de la guía para GF1.



(a) $J^+(E)/J_{max}$ para GT1.



(b) $J^+(E)$ para GT1.

Figura 6.5: Espectros según el número de colisiones a la entrada y a la salida de la guía para GT1.

6.3. Detector del flujo absorbido a lo largo de la guía

En esta sección, se implementó un detector del ritmo de absorciones lineal a lo largo de la guía, Figura 6.6. Se observa que los neutrones fríos dejan de ser absorbidos por la guía a partir de una determinada distancia (llámese L_0), ver Figura 6.7. Este comportamiento también se observa en neutrones térmicos, pero a una distancia mayor. Este fenómeno es consecuencia de que a partir de una distancia determinada de la entrada de la guía, los neutrones colisionan con ángulos suficientemente bajos como para ser transportados. Dicha distancia es menor cuanto menor es la energía del neutrón.

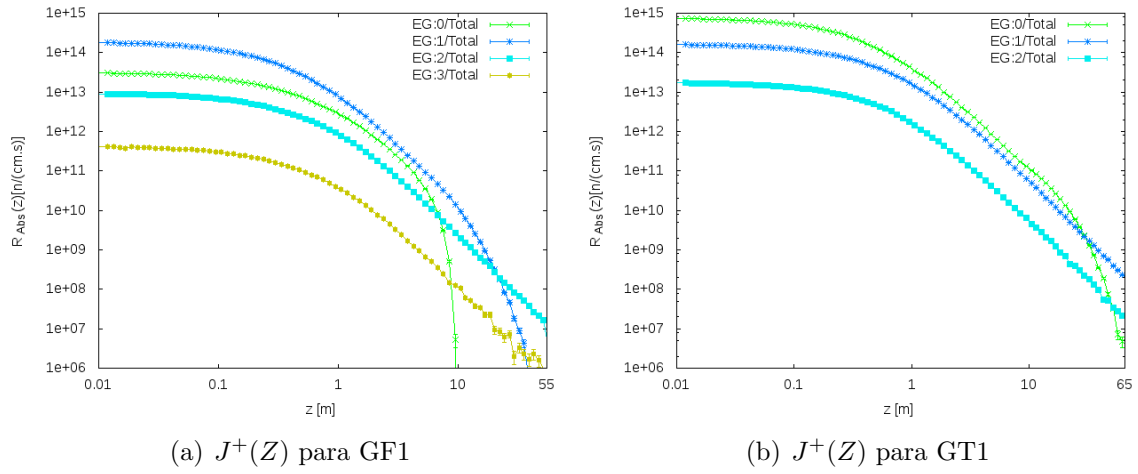


Figura 6.6: Ritmo de absorción lineal según el macrogrupo.

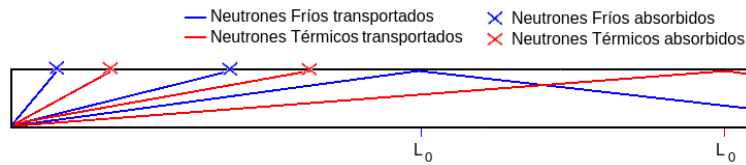


Figura 6.7: Longitud de no absorción (L_0).

Capítulo 7

Conclusiones

Mediante el presente trabajo integrador, se implementó con buenos resultados una cadena de cálculo asociada a los haces de neutrones del Reactor RA-10. Esto involucró el conocimiento acerca del diseño integral del reactor, y en particular del detalle de fuentes fría y térmica, geometría de conductos y guías, entre otros. Además, implicó el desarrollo de diversas herramientas de uso general y su implementación efectiva al caso de estudio.

Con respecto al cálculo, las fuentes de tracks resultan suficientes para calcular corrientes integrales en los puntos de utilización de los haces. Sin embargo, si lo que se desea es un grado de detalle razonable respecto a la información distribucional en dichos puntos, estas fuentes no son recomendables para obtener tal información. Por lo tanto, es imprescindible la implementación de las fuentes de distribuciones a fin de obtener una caracterización bien detallada.

Referente a las fuentes de distribuciones generadas, para lograr una correcta reproducción del comportamiento distribucional de la corriente a lo largo de todo el haz resulta fundamental un correcto modelado de las distribuciones angulares. A su vez, es de vital importancia mantener cierto grado de correlación entre todas las variables.

Se desarrollaron herramientas que permiten generar fuentes de neutrones superficiales con un alto grado de detalle. En particular, se generaron todas las fuentes necesarias para el cálculo de haces del RA-10. Asimismo, se obtuvieron resultados tanto de interés académico como de interés para el Proyecto RA-10.

Los resultados obtenidos permiten advertir que todos los haces cumplen con los requerimientos de diseño listados en la Tabla [1.1](#).

Apéndice A

Cálculo de Magnitudes

Se lista a continuación las relaciones empleadas para la obtención de las magnitudes calculadas y las graficadas.

$$J^+[\frac{n}{cm^2.s}] = \frac{1}{A} \int_0^\infty dE \int_A d\vec{r} \int_{2\pi^+} \varphi(E, \vec{r}, \hat{\Omega}) | \check{n}.\hat{\Omega} | d\hat{\Omega} \quad (A.1)$$

$$J^+(E)[\frac{n}{cm^2.s.meV}] = \frac{1}{A \Delta E} \int_{\Delta E} dE \int_A d\vec{r} \int_{2\pi^+} \varphi(E, \vec{r}, \hat{\Omega}) | \check{n}.\hat{\Omega} | d\hat{\Omega} \quad (A.2)$$

$$J_{E1-E2}^+(x_i, y_j)[\frac{n}{cm^2.s}] = \frac{1}{A_{ij}} \int_{E1}^{E2} dE \int_{A_{ij}} d\vec{r} \int_{2\pi^+} \varphi(E, \vec{r}, \hat{\Omega}) | \check{n}.\hat{\Omega} | d\hat{\Omega} \quad (A.3)$$

$$J_{E1-E2}^+(x_i, y_j).p(\mu)[\frac{n}{cm^2.s.sr}] = \frac{1}{A_{ij} \Delta\mu} \int_{E1}^{E2} dE \int_{A_{ij}} d\vec{r} \int_{2\pi} d\varphi \int_{\Delta\mu} \varphi(E, \vec{r}, \hat{\Omega}) \mu d\mu \quad (A.4)$$

$$J_{E1-E2}^+(x_i, y_j).p(\mu_0, \varphi)[\frac{n}{cm^2.s}] = \frac{1}{A_{ij} \Delta\varphi} \int_{E1}^{E2} dE \int_{A_{ij}} d\vec{r} \int_{\mu_0}^1 \mu d\mu \int_{\Delta\varphi} \varphi(E, \vec{r}, \hat{\Omega}) d\varphi \quad (A.5)$$

Apéndice B

Error estadístico en McStas

En una simulación típica, el resultado de McStas[5] consistirá en una cuenta de historias de neutrones (“rayos”) con diferentes pesos. La suma de esos pesos es un estimado del número medio de neutrones incidentes al detector por segundo en un experimento “real”. El resultado del conteo resulta:

$$I = \sum_i p_i = N\bar{p} \quad (\text{B.1})$$

donde N es el número de rayos incidentes al detector y \bar{p} el peso promedio.

Para dar un estimado del error estadístico, se considera primero la aproximación de que el peso de todos los neutrones contados es el mismo, o sea que $p_i \approx \bar{p}$, y que se observa un número elevado de neutrones, $N \geq 10$. Luego, se asemeja que N sigue una distribución normal con una incerteza $\sigma(N) = \sqrt{N}$. Entonces, la incerteza estadística de la intensidad observada se torna:

$$\sigma(I) = \sqrt{N}\bar{p} = I/\sqrt{N} \quad (\text{B.2})$$

como resulta en los experimentos de neutrones en la realidad (donde $\bar{p} \equiv 1$). Para una mejor aproximación se vuelve a la ecuación B.1. Permitiendo variaciones en N y \bar{p} , se calcula la varianza de la resultante intensidad, asumiendo que las dos variables son estadísticamente independientes:

$$\sigma^2(I) = \sigma^2(N)\bar{p}^2 + N^2\sigma^2(\bar{p}) \quad (\text{B.3})$$

Asumiendo que N sigue una distribución normal, se llega a que $\sigma^2(N)\bar{p}^2 = N\bar{p}^2$. Luego, asumiendo que los pesos individuales, p_i , siguen una distribución gaussiana (lo cual no siempre es cierto) se tiene que $N^2\sigma^2(\bar{p}) = \sigma^2(\sum_i p_i) = N\sigma^2(p_i)$ y se llega a que:

$$\sigma^2(I) = N (\bar{p}^2 + \sigma^2(p_i)) \quad (\text{B.4})$$

La varianza estadística de los p_i es estimada por $\sigma^2(p_i) \approx (\sum_i p_i^2 - N\bar{p}^2)/(N-1)$. La varianza resultante se lee:

$$\sigma^2(I) = \frac{N}{N-1} N \left(\sum_i p_i^2 \bar{p}^2 \right) \quad (\text{B.5})$$

Para casi cualquier valor de N positivo, esto último es muy bien aproximado por la simple expresión

$$\sigma^2(I) \approx \sum_i p_i^2 \quad (\text{B.6})$$

Como un chequeo de consistencia, se nota que para p_i todos iguales, esto se reduce a la ecuación B.2. Para computar las intensidades y las incertezas, los detectores en McStas seguirán $I = \sum_i p_i$ y $M = \sum_i p_i^2$.

Apéndice C

Actividades relacionadas a la Práctica Profesional Supervisada

La Práctica Profesional Supervisada (PPS) se llevó a cabo en el Departamento de Física de Reactores y Radiaciones del Centro Atómico Bariloche durante los últimos 2 semestres de la carrera Ingeniería Nuclear.

Las actividades desarrolladas a lo largo de la PPS fueron las siguientes:

- Se tomó conocimiento integral del diseño del reactor RA-10 y de los sistemas de guías y de colimadores de los haces del reactor.
- Se interiorizó en el uso de la herramienta de McStas y de diversos de sus componentes.
- Se modificó componentes ya existentes con el fin de entender el código fuente de dicha herramienta, hasta alcanzar la capacidad de generarlos de cero.
- Se estudió en su totalidad los haces tanto para neutrones de performance como para neutrones de otras energías.
- Se realizaron múltiples simulaciones sobre dichos haces, implementando las herramientas en McStas desarrolladas.
- Se elaboró el informe final.

Apéndice D

Actividades de Proyecto y Diseño

Para el desarrollo del proyecto se realizaron actividades de Proyecto y Diseño basadas en el empleo de conocimientos adquiridos a lo largo de toda la carrera. Dichas actividades contribuyeron a los siguientes desarrollos realizados en el proyecto:

- Aprendizaje del diseño del reactor y sus haces - Capítulos 1 y 2 (20 hs.)
- Aprendizaje en el manejo de la herramienta de simulación McStas - Capítulo 1 y 2 (30 hs.)
- Programación de Componentes en McStas para el cálculo de haces - Capítulo 1,3 y 4 (40 hs.)
- Obtención de Fuentes de Distribuciones en las superficies de salida de los conductos de extracción - Capítulo 4 (40 hs.)
- Obtención de resultados integrales y distribucionales en los puntos de utilización de los haces - Capítulo 5 (30 hs.)
- Análisis de resultados - Capítulo 4, 5 y 7 (20 hs.)
- Realización de estudios complementarios y de programación de componentes adicionales - Capítulo 6 (20 hs.)

Bibliografía

- [1] <http://www.swissneutronics.ch/?id=14>. 07-07-17. [xi](#), [xi](#), [4](#), [5](#)
- [2] <http://www.lahn.cnea.gov.ar/index.php>. 30-05-17. [2](#)
- [3] MEM-420/RA-10/6000-2-007-0. Acciones RCD Etapa 3 Guías de neutrones. [3](#)
- [4] IT-47/RA-10/6006-3-001-1. Análisis de los haces de neutrones térmicos y fríos. [3](#), [5](#), [15](#), [19](#), [20](#)
- [5] User and Programmers Guide to the Neutron Ray-Tracing Package Mcstas version 2.3. 06-04-16. [77](#)

Agradecimientos

A mi familia por todo el apoyo que me brindó.

A Ariel por toda la ayuda que me dió.

